



Ultraschallmessverfahren für komplexe Suspensions- strömungen in kleinen Geometrien: Untersuchung am Beispiel der Zink-Luft-Flussbatterie

Christian Kupsch

Geboren am: 22.04.1988 in Berlin

genehmigte Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Vorsitzende:

Prof. Dr. rer. nat. et Ing. habil. Elfgard Kühnicke

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske

Prof. Dr.-Ing. Christian Cierpka

Eingereicht am: 25.11.2019

Verteidigt am: 03.09.2020



Kurzfassung

Der zunehmende Einsatz regenerativer Energiequellen erfordert die Nutzung von Energiewischenspeichern, die umweltfreundlich, günstig und skalierbar sein sollten. Die Zink-Luft-Flussbatterie (ZLFB) kann perspektivisch diese Anforderungen erfüllen, wobei zur Bereitstellung der gespeicherten Energie eine Suspension aus Zinkpartikeln in einem gelierten Elektrolyt durch eine elektrochemische Zelle gepumpt wird. Um die Strömungsstruktur der ZLFB auszulegen und Fehlfunktionen zu vermeiden, ist ein grundlegendes Verständnis der Rheologie der Zinksuspension notwendig. Außerdem kann über die Einstellung einer geeigneten Strömung die bei der Entladung erreichte elektrische Leistungsdichte gesteigert werden.

Bereits die Flüssigphase der Zinksuspension weist eine komplexe nicht-Newtonsche Rheologie auf, welche durch die Zugabe der Partikel komplexer wird. Für das grundlegende Verständnis der Rheologie werden daher Modellexperimente durchgeführt, wobei in dieser Arbeit ein L-förmiger Kanal mit Strömungsaufweitung untersucht wurde, um die komplexen strömungsmechanischen Eigenschaften der Zinksuspension abzubilden. Zur Erfassung des Strömungsfeldes ist eine Ortsauflösung von 1 ... 2 mm in einem Messbereich von $20 \times 15 \text{ mm}^2$ erforderlich. Ultraschall ist prinzipiell geeignet, um das Strömungsfeld in der opaken Suspension zu erfassen, wobei die wesentliche Herausforderung in den starken Wellenfrontverzerrungen besteht, welche durch die Zinkpartikel eingebracht werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Ultrasound Imaging Velocimetry (UIV) robuster gegenüber diesen Störungen ist, als die Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV). Die UIV wurde daher mittels Geschwindigkeitsnormal an die messtechnischen Randbedingungen der Zinksuspension angepasst und charakterisiert. Bei einer Ortsauflösung von 1,6 mm wurde eine Gesamtmessunsicherheit von 2,5 % axial und 4,1 % lateral zur Schallausbreitungsrichtung erreicht. Das im Modellexperiment gemessene Strömungsfeld weist eine Totzone an der Strömungsumlenkung auf, deren Auftreten durch eine von der Scherhistorie abhängige Viskosität erklärt werden kann. Dieser Effekt wird als Thixotropie bezeichnet.

Durch die In-situ-Messung der Strömung in einer aktiven ZLFB kann eine Korrelation von Strömung und elektrischer Leistung erfolgen und die erzielte Leistungsdichte perspektivisch durch eine Anpassung der Strömung gesteigert werden. Bei der Messung im 2,6 mm hohen Anodenspalt muss aufgrund der komplexen Rheologie der Suspension und der daraus resultierenden hohen Geschwindigkeitsgradienten eine Ortsauflösung von unter 100 μm bei gleichzeitig kleiner Ultraschallfrequenz realisiert werden, da der Ultraschall für hohe Frequenzen nicht in die Zinksuspension eindringt. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde die Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV) genutzt, welche Ortsauflösungen unterhalb des Beugungslimits ermöglicht. Einzelne nichtlineare Streupartikel werden mittels Harmonic Imaging isoliert abgebildet und verfolgt, wobei die durch die Zinkpartikel eingebrachten Wellenfrontstörungen durch einen kohärenzgewichteten Strahlformer kompensiert werden. Es wurde eine Ortsauflösung von 67 μm axial und 30 μm lateral zur Schallausbreitungsrichtung bei einer Anregungswellenlänge von 330 μm erreicht. Trotz der stark streuenden Zinksuspension, konnte so eine Messung in der aktiven ZLFB mit einer maximalen Messunsicherheit von 12,5 % durchgeführt werden. Dabei wurde eine Wandgleitgeschwindigkeit von 3 mm s^{-1} bei einer maximalen Geschwindigkeit von etwa 8 mm s^{-1} festgestellt. Die SRPTV kann darüber hinaus in anderen technischen Prozessen eingesetzt werden, in denen Suspensionsströmungen in kleinen Geometrien auftreten.



Abstract

For the efficient use of renewable energies, energy storage systems are required that are environmentally friendly, low priced and scalable. The zinc-air flow battery (ZAB), which is operated by pumping an opaque suspension of zinc particles in an gelled electrolyte through an electrochemical cell, is a promising candidate as energy storage system for these requirements. To design the fluidic structures and avoid malfunction, a fundamental understanding of the rheology of the zinc suspension is required. Additionally, the electrical performance of the cell can be improved by optimizing the flow in the electrochemical cell.

The liquid phase of the suspension itself has complex non-Newtonian properties, which are even more complex when the particles are considered. For the fundamental understanding of the suspension rheology, model experiments are conducted. In this work an L-shaped channel with a widening is used to represent relevant effects from the complex rheology of the suspension. To measure the flow field, a spatial resolution of 1 ... 2 mm and a measurement area of $20 \times 15 \text{ mm}^2$ are required. Ultrasound can be used to measure the flow in opaque liquids, but wavefront distortions are introduced by the zinc particles. Established measurement methods for homogeneous opaque fluids, the Ultrasound Imaging Velocimetry (UIV) and the Ultrasound Doppler Velocimetry (UDV), were compared for the application at the suspension. The UIV has a 50 % lower random deviation, which makes it more suitable for the flow measurement in the suspension and it was adapted to the measurement conditions in the suspension. At a spatial resolution of 1.66 mm, a velocity uncertainty of 2.5 % axial and 4.1 % lateral to the ultrasound propagation were achieved. The application of the UIV to the suspension flow in the model experiment revealed a thixotropic behavior of the fluid, which resulted in a dead flow zone opposite to the inlet of the channel.

The in situ measurement of the flow in an active ZAB, allows to correlate electrical performance and flow and thereby an improvement of the cell performance by adapting the flow. For the measurement in the anodic channel with a width of 2.6 mm, a spatial resolution of $100 \mu\text{m}$ is required because of the high velocity gradients due to the non-Newtonian rheology of the suspension. The high spatial resolution has to be achieved at low ultrasound frequencies, since the ultrasound does not penetrate into the suspension for high frequencies. To achieve this, the Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV) was used, which allows a spatial resolution beyond the diffraction limit. Harmonic Imaging is used to image isolated non-linear tracer particles, which are tracked for velocity estimation. The speckle and image distortion due to the induced wavefront distortions are compensated with a coherence weighting beamformer. A spatial resolution of $67 \mu\text{m}$ axial and $30 \mu\text{m}$ lateral to the ultrasound propagation were achieved. Despite the strong scattering of the ultrasound at the zinc particles, a maximum velocity uncertainty of 12.5 % referred to the maximum velocity was achieved for the measurement in the active ZAB. A slip velocity of 3 mm at a maximum velocity of 8 mm was observed. The SRPTV can be applied to other technical processes, where suspension flows in small geometries play an important role.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand an der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik der Technischen Universität Dresden. Dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Jürgen Czarkse bin ich zu besonderem Dank verpflichtet, da er die exzellenten Rahmenbedingungen für diese Arbeit geschaffen hat. Ebenso möchte ich Dr. rer. nat. Büttner und Dr.-Ing Richard Nauber für ihre Unterstützung danken. Sie haben mir den Einstieg in die Welt der Wissenschaft durch viele Ratschläge und wertvolle Diskussionen ermöglicht.

An meinen Arbeitsplatz zu kommen, hat mich in meiner Promotionszeit gefreut und motiviert. Das lag vor allem an dem tollen Kollegium, welches ich als engagiert, hilfsbereit und äußerst loyal kennen gelernt habe. Besonders danken möchte ich Dr.-Ing. Robert Kuszmierz (Robby) für viele Diskussionsrunden im Freien. Besonders erwähnt sei außerdem das Hannes-Radner-Gerätezentrum (HRGZ), in dessen Rahmen Hannes Radner mir unzählige Male bei der Überwindung technischer Schwierigkeiten oder mit der Bereitstellung von experimentellem Equipment geholfen hat.

Außerdem haben einige Studenten zum Erfolg des Forschungsvorhabens beigetragen. Dafür möchte ich im Speziellen bei meinen ehemaligen Diplomanden Sören Schusser, David Weik und Franz Grabbert sowie bei Paul Schwenteck als Studentische Hilfskraft bedanken.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines AiF-Forschungsvorhabens in Kooperation mit dem Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH (ZBT) erarbeitet. Lukas Feierabend hat von Seiten des ZBT das Forschungsvorhaben bearbeitet. Über die Projektzeit ist er nicht nur ein guter Kollege, sondern ein Freund geworden. Die Zusammenarbeit mit ihm hat mich stets motiviert und meinen Arbeitsalltag bereichert. Ich bin sehr froh ihn kennengelernt zu haben.

Danken möchte ich auch meinen Eltern. Ihren Beitrag zu meiner Entwicklung und damit auch zu dieser Arbeit kann ich erst jetzt richtig schätzen, da ich selbst Vater bin. Meiner kleinen Schwester Andrea und ihrem Mann Uli möchte ich für die Nachhilfe in Chemie danken: Am Ende ist eben alles Chemie. Meiner kleinen Familie bestehend aus meiner Frau Elisa und meinem Sohn Mika möchte ich einfach sagen, dass ich unendlich froh bin, dass es sie gibt und sie mich durch diese manchmal auch nervenaufreibende Zeit mit viel Verständnis und Rückhalt begleitet haben. Euch möchte ich diese Arbeit widmen.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung	1
1.2 Stand der Technik	4
1.3 Lösungsansatz und Struktur der Arbeit	8
2 Theoretische Grundlagen	11
2.1 Grundlagen der Schallausbreitung	11
2.1.1 Schallausbreitung in homogenen Medien	11
2.1.2 Schallausbreitung in inhomogenen Medien	13
2.2 Ultraschall Bildgebung	14
2.2.1 Phased-Array-Prinzip	15
2.2.2 Plane wave imaging	16
2.2.3 Grenzen der Schallfeldfokussierung	16
2.3 Messung von Strömungsfeldern	17
2.3.1 Ultraschall-Doppler-Velozimetrie	18
2.3.2 Ultrasound Imaging Velocimetry	19
2.3.3 Ultrasound Particle Tracking Velocimetry	19
2.4 Nichtlineare akustische Effekte	20
2.4.1 Beschreibung von Linearität	20
2.4.2 Interaktion von nichtlinearen Streupartikeln und Schallwelle	20
2.4.3 Harmonic Imaging	21
3 Experimentelle Grundlagen	25
3.1 Charakterisierung der Zinksuspension	25
3.1.1 Zusammensetzung der Zinksuspension	25
3.1.2 Bestimmung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit	26
3.1.3 Bestimmung der spezifischen akustischen Impedanz	29
3.2 Messtechnik	30
3.2.1 Ultraschallforschungsplattform: Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter	30
3.2.2 Ultraschallwandler	32
4 Verfahren zur Strömungsmessung im Modellexperiment	37
4.1 Experimenteller Aufbau	37

4.2	Untersuchung geeigneter Verfahren zur Messung von Strömungsfeldern in der Zinksuspension	38
4.3	Optimierung der Signalverarbeitung und Charakterisierung der Messeigenschaften	44
4.3.1	Geschwindigkeitsnormal	44
4.3.2	Optimierung der Messsystemparameter	45
4.3.3	Charakterisierung der Messeigenschaften	48
4.3.4	Validierung	49
4.4	Messung der Suspensionsströmung im Modellexperiment	55
4.4.1	Messergebnisse	55
4.4.2	Vergleich von Simulation und Messung	58
4.5	Fazit	61
5	Verfahren zur In-situ-Strömungsmessung in einer Zink-Luft-Flussbatterie	63
5.1	Experimenteller Aufbau	63
5.2	Strömungsmessung unterhalb des Beugungslimits - Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV)	65
5.2.1	Nutzung nichtlinearer Streupartikel	68
5.2.2	Trennung von linearem und nichtlinearem Signalanteil	72
5.2.3	Strahlformung mit Kompensation der Streuung	76
5.2.4	Particle Tracking	80
5.3	Charakterisierung der Messeigenschaften	81
5.3.1	Vorgehen zur Charakterisierung der Messeigenschaften	82
5.3.2	Untersuchung der Positionsunsicherheit	83
5.3.3	Untersuchung der Geschwindigkeitsunsicherheit	92
5.4	Messung an einer aktiven Zink-Luft-Flussbatterie	95
5.4.1	Aufbau und Durchführung	95
5.4.2	Messergebnisse	97
5.4.3	Vergleich von Simulation und Messung	97
5.5	Fazit	102
6	Zusammenfassung und Ausblick	103
6.1	Erkenntnisse und Fortschritt	103
6.1.1	Ultrasound Imaging Velocimetry	103
6.1.2	Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry	104
6.1.3	Fazit	106
6.2	Ausblick und weiterführende Arbeiten	106
6.2.1	Messtechnik	106
6.2.2	Anwendung	107
	Literaturverzeichnis	109
	Publikationsverzeichnis	117
	Artikel in Zeitschriften mit peer-review	117

Tagungsbeiträge	117
Patente	119

Symbolverzeichnis

Bezeichnung	Beschreibung
c	Schallgeschwindigkeit
g	Konstanter Faktor
α	akustische Dämpfung
τ	Zeitverzögerung bei der Strahlformung
$d_{\text{elevation}}$	Höhe der Ultraschallelemente orthogonal zur Messebene (engl.: elevation direction)
δ	Schrittgröße bei der Quantisierung einer Ortskoordinate
$d_{\text{horizontal}}$	Breite der Ultraschallelemente
ρ	Dichte
f_{Doppler}	Dopplerfrequenz
f	Frequenz
f_{prf}	Pulswiederholrate
$FWHM$	Halbwertsbreite des Fokus (Full Width at Half Maximum)
Z_0	Spezifische akustische Impedanz
i	Index
K	Kompressionsmodul
ω	Kreisfrequenz
l_{iw}	Größe des Interrogation Window
λ	Wellenlänge des Ultraschalls
∇	Nabla-Operator
n_{epp}	Anzahl der Ultraschallaussendungen zur Ermittlung eines Geschwindigkeitswertes (engl.: emissions per profile)
N_{periods}	Anzahl der Perioden in einem Ultraschallpuls
N_{pos}	Anzahl der Messpositionen
N_{el}	Anzahl der Ultraschallwandlerelemente
T	Periodendauer
φ	Signalphase
d_{pitch}	Mittlerer Abstand der Mitte benachbarter Ultraschallelemente
Γ	Betrag des komplexen Reflexionsfaktors
F	relative Messabweichung
Re	Reynolds-Zahl
p	Schalldruck
v_{schnelle}	Schallschnelle
σ_t	Standardunsicherheit der Zeit
σ_v	Vektor der Standardunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit

Bezeichnung	Beschreibung
σ_{v_x}	Standardunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung
σ_{v_y}	Standardunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung
σ_{v_z}	Standardunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit in z-Richtung
$\sigma_{\mathbf{x}}$	Vektor der Standardunsicherheit der Position
σ_x	Standardunsicherheit der Position in x-Richtung
σ_y	Standardunsicherheit der Position in y-Richtung
σ_z	Standardunsicherheit der Position in z-Richtung
r	Zeitsignal
r_a	Ausgangssignal
r_e	Eingangssignal
R	Fouriertransformierte eines Zeitsignals
s	empirische Standardabweichung
t	Zeit
v	Strömungsgeschwindigkeit
v_s	Strömungsgeschwindigkeit in Schallausbreitungsrichtung
\mathbf{v}	Strömungsgeschwindigkeitsvektor
v_x	Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung
v_y	Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung
v_z	Strömungsgeschwindigkeit in z-Richtung
v	Volumenanteil
k	Wellenzahl
\mathbf{x}	Ortsvektor
x	kartesische Ortskoordinate x
y	kartesische Ortskoordinate y
z	kartesische Ortskoordinate z

Abkürzungsverzeichnis

Bezeichnung	Beschreibung
2C	zweikomponentig
2D	zweidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
ADU	Analog-Digital-Umsetzer
CFD-Simulation	Computational-Fluid-Dynamics-Simulation (dt.: Simulation mittels numerischer Strömungsmechanik)
DAS	Delay-and-Sum-Strahlformer
DGV	Doppler-Global-Velozimetrie
DMAS	Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer
DS-DMAS	Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer
EIS	Elektrische-Impedanz-Spektroskopie
FWHM	Full Width at Half Maximum (dt.: Halbwertsbreite)
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HB-Modell	Herschel-Bulkley-Modell
HI	Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung)
MRV	Magnetresonanz-Velozimetrie
PAA	poly acrylic acid (dt.: Polyacrylsäure)
PAUDV	Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PI	Pulsinversionsverfahren
PIV	Particle Image Velocimetry (dt.: Partikelbild-Velozimetrie)
PMMA	Polymethylmethacrylat
PWC	Plane Wave Compounding
PWI	Plane Wave Imaging (dt.: Bildgebung mit einer ebenen Welle)
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise ratio)
SRPTV	Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry
UDV	Ultraschall-Doppler-Velozimetrie
UIV	Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie)
ULM	Ultrasound Localization Microscopy
UPTV	Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (dt.: Ultraschallgeschwindigkeitsmessung mittels Partikelverfolgung)
ZLFB	Zink-Luft-Flussbatterie

Tabellenverzeichnis

3.1	Zusammensetzung der Zinksuspension.	25
3.2	Größenverteilung der Zinkpartikel. Angabe in vol.-%.	26
3.3	Übersicht der Messparameter für die Messung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit der Zinksuspension.	29
3.4	Spezifikationen für das Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter (PAUDV).	32
3.5	Spezifikationen des Imasonic-Arrays	34
3.6	Spezifikationen des Vermon-Zweifrequenz-Arrays	35
4.1	Anforderungen an das Messsystem für das Modellexperiment.	39
4.2	Parameter und Spezifikationen für die numerische Simulation der Schallausbreitung in der Zinksuspension	39
4.3	Physikalische Eigenschaften der kontinuierlichen und suspendierten Phase der Zinksuspension.	40
4.4	Parameter für die Messung am Geschwindigkeitsnormal.	47
4.5	Parameter für die Messung der Glyzerinströmung im Modellexperiment	52
4.6	Parameter für die Messung der Suspensionsströmung und der Elektrolytströmung im Modellexperiment.	56
5.1	Anforderungen an das Messsystem für die Messung in der aktiven ZLFB.	66
5.2	Beiträge zur Positionsunsicherheit bei der Lokalisierung eines Streupartikels und deren Ursachen.	84
5.3	Parameter für die Messung am Positionsnormal.	85
5.4	Beiträge zur Positionsunsicherheit bei der Lokalisierung eines Streupartikels.	92
5.5	Beiträge zur Messunsicherheit der Geschwindigkeit v_x bei der Messung in der ZLFB.	92
5.6	Parameter für die Messung an der aktiven ZLFB.	101

Abbildungsverzeichnis

1.1	Elektrochemische Zelle einer ZLFB mit den für den Zellbetrieb (Entladung) relevanten chemischen Reaktionen.	2
2.1	Schematische Darstellung einiger Elemente eines Ultraschall-Phased-Arrays.	16
2.2	Vergleich von sendeseitiger und empfangsseitiger Fokussierung für einen Fokuspunkt.	17
2.3	Schematische Darstellung der Amplitudenspektren des Anregungssignals und des gestreuten Signals für einen linearen und einen nichtlinearen Streuprozess.	22
2.4	Schematische Gegenüberstellung einer Abbildung mit konventioneller Bildgebung und mit Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung) (HI).	23
3.1	Mikroskopische Aufnahme der Zinkpartikel aus Partikelklasse 1.	26
3.2	Messanordnung zur experimentellen Bestimmung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit der Zinksuspension.	27
3.3	Dämpfungskoeffizient α und Schallgeschwindigkeit c der Zinksuspension (Partikelklasse 1) für verschiedene Volumenanteile v der Zinkpartikel	28
3.4	Experimenteller Aufbau zur Messung der akustischen Impedanz der Zinksuspension.	30
3.5	Systemarchitektur des PAUDV. Mit Genehmigung entnommen aus [65].	33
3.6	Schnitt durch das Zweifrequenz-Array.	35
4.1	Links: dreidimensionale Ansicht des Strömungskanals für das Modellexperiment. Der Messbereich befindet sich in z-Richtung mittig. Rechts: Schnitt durch die Messebene.	38
4.2	Simulationsanordnung: Ein Ultraschallpuls wird von einer Punktquelle (rotes Kreuz) zu einem Punktempfänger (blaues Kreuz) durch die Zinksuspension propagiert.	39
4.3	Verteilung des Schalldruckpegels für $t = 3 \mu\text{s}$ nach der Aussendung des Ultraschallpulses.	41
4.4	(a) Überlagerung von empfangenen Signalen für 50 verschiedene Partikelanordnungen (grau), sowie deren Mittelwert (rot). (b) Relative zufällige Standardabweichung $F_{v,zuf}$ in Abhängigkeit des Volumenanteils v der Zinkpartikel für die Geschwindigkeitsschätzung mittels Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV) und Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie) (UIV).	43
4.5	Geschwindigkeitsnormal für laterale (links) und axiale (rechts) Strömungskomponente.	45

4.6	Ultraschallbild der Suspension während der Messung im lateralen Geschwindigkeitsnormal.	47
4.7	Oben: relative Messabweichung der axialen (links) und der lateralen Strömungskomponente (rechts), Unten: örtliche Auflösung (links) und Zielfunktion (rechts).	48
4.8	(a) Gemessene Geschwindigkeitsfelder für UIV mit Gaußscher (oben) und parabolischer (mittig) Subpixel-Interpolation sowie das simulierte (unten) Geschwindigkeitsfeld für Glyzerin. Messpunkte an denen die Standardabweichung der Geschwindigkeit größer als 2 mm s^{-1} ist, wurden weiß maskiert. (b) Strömungsprofile der x-Komponente der Strömung an ausgewählten x-Positionen.	53
4.9	Standardabweichung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit für UIV mit Gaußscher (links) und parabolischer (rechts) Subpixel-Interpolation.	54
4.10	Gemessene Strömungsfelder für die Zinksuspension mit $\nu = 8 \text{ vol.-%}$ (links) und $\nu = 0 \text{ vol.-%}$ (rechts).	59
4.11	Oben: Strömungsprofile der Komponente v_x für ausgewählte Positionen entlang der x-Richtung. Unten: Messunsicherheit σ_{v_x} . Jeweils für die Zinksuspension mit $\nu = 8 \text{ vol.-%}$ (links) und $\nu = 0 \text{ vol.-%}$ (rechts).	60
4.12	Vergleich der gemessenen Strömung mit einer numerischen Simulation basierend auf dem Herschel-Bulkley-Modell (HB-Modell) und dem adaptierten HB-Modell. (a) Geschwindigkeitsfelder, (b) Strömungsprofile der x-Komponente für ausgewählte Positionen entlang der x-Achse.	62
5.1	Explosionsansicht der ZLFB.	64
5.2	Schnitt durch den Strömungskanal der ZLFB.	65
5.3	Prinzip der SRPTV.	68
5.4	(a) Amplitudenspektren der Ultraschallsignale aus der KOH-Lösung mit $300 \mu\text{l}$ der Mikrobläschensuspension sowie für Streupartikel aus Polyamid mit einem mittleren Durchmesser von $20 \mu\text{m}$. Die Frequenzbänder für die Auswertung der Signalenergie in der ersten und zweiten Harmonischen sind blau unterlegt. Das Amplitudenspektrum wurde auf die maximale Amplitude zum Zeitpunkt $t = 0$ normiert. (b) Signalenergie im Frequenzband der zweiten Harmonischen für die KOH-Lösung mit $300 \mu\text{l}$ der Mikrobläschensuspension.	70
5.5	Signalenergie im Frequenzband (vgl. 5.4a) der zweiten (f_2) Harmonischen, wenn das Fluid gepumpt wird.	71
5.6	Schematische Darstellung der Amplituden der ersten und zweiten Harmonischen für verschiedene Fälle.	73
5.7	(a) Vereinfachte, schematische Darstellung des Amplitudenspektrums des empfangenen Signals. (b) Amplitudenspektrum des empfangenen Signals mit und ohne Anwendung des Pulsinversionsverfahrens.	75
5.8	Blockdiagramm des Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformers.	77

5.9	Simulationsanordnung für den Vergleich des Delay-and-Sum-Strahlformers (DAS) und des Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformers (DS-DMAS).	78
5.10	Vergleich der Abbildung einer Punktschallquelle für den Delay-and-Sum-Strahlformer (DAS) und den Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer (DS-DMAS).	79
5.11	Schematische Darstellung (a) und Bild (b) der experimentellen Anordnung zur Erzeugung des Positionsnormals	86
5.12	Darstellung der aus den Ultraschallbildern ermittelten Positionen (Messung) und der tatsächlichen Position (Referenz) des Streukörpers.	87
5.13	Systematische Abweichung der x - und y -Position zwischen Messung und Referenz.	88
5.14	Unsicherheit der Positionsbestimmung eines Streupartikels in Abhängigkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses.	89
5.15	Simulationsanordnung für die Charakterisierung der zufälligen Messabweichung aufgrund der Zinkpartikel bei der Positionsbestimmung einer Punktquelle.	90
5.16	Abbildung der Punktschallquelle ($x = 0$ mm, $y = 4$ mm) aus der numerischen Simulation für vier verschiedene zufällige Anordnungen der Zinkpartikel.	91
5.17	Bilder der geöffneten ZLFB (links) und der experimentellen Anordnung (rechts).	95
5.18	Vergleich der bei der Messung in der ZLFB aufgenommenen Ultraschallbilder mit (a) dem Delay-and-Sum-Strahlformer (DAS) und (b) dem Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer (DS-DMAS).	96
5.19	Links: Ergebnis der Strömungsmessung in der betriebenen ZLFB. Die aus den einzelnen Trajektorien ermittelten Geschwindigkeiten $v_{x,i}$ sind als graue Punkte dargestellt. Dabei wurden nur Geschwindigkeiten berücksichtigt, welche im $3\sigma_{v_x}$ -Intervall um den Mittelwert der Geschwindigkeit v_x liegen. Das Strömungsprofil wurde mit einem Polynom vierten Grades approximiert (grüne Linie, gekennzeichnet durch "fit "). Rechts: Beiträge zur Geschwindigkeitsunsicherheit sowie Gesamtunsicherheit der Geschwindigkeit	98
5.20	Vergleich von gemessenem und simuliertem Strömungsprofil in der aktiven ZLFB.	100

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung

Suspensionsströmungen spielen in zahlreichen technischen und industriellen Prozessen eine wesentliche Rolle, wie bei der Herstellung von Kosmetika und Lebensmitteln [1] oder als fließende Suspensionselektrode in Energiespeichern [2]. Die Kenntnis der auftretenden Strömungen erlaubt die Optimierung dieser Prozesse und eine Vermeidung von Fehlfunktionen. Die Strömung kann experimentell oder simulativ untersucht werden, wobei für die Simulation experimentell validierte numerische Modelle benötigt werden. Die messtechnische Erfassung der Suspensionsströmung ist daher für beide Herangehensweisen von grundlegender Bedeutung. Die gesteigerte Rechenleistung moderner Datenverarbeitungssysteme, welche heutzutage für die Messtechnik zur Verfügung steht, ermöglicht die Anwendung moderner und rechenintensiver Signalverarbeitungsverfahren. Dadurch können messtechnische Herausforderungen, wie die Strömungsmessung in stark streuenden Suspensionen überwunden werden. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Messverfahren für Suspensionsströmungen am Beispiel der Strömung einer Suspension aus Zinkpartikeln und einem gelierten wässrig-alkalischen Elektrolyt untersucht werden, welche als fließende Suspensionselektrode in der Zink-Luft-Flussbatterie (ZLFB) [3] eingesetzt wird. Die ZLFB kann perspektivisch als Energiespeicher für erneuerbare Energie eingesetzt werden [4] und somit einen Beitrag zur Energiewende leisten.

Durch den fünften Weltklimabericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (dt.: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, auch Weltklimarat) wurde das von Menschen ausgestoßene CO_2 als Hauptursache für den Klimawandel identifiziert [5]. Ohne zusätzliche Anstrengungen zum Klimaschutz, wie beispielsweise der Reduktion des CO_2 -Ausstoßes, soll die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche bis zum Jahr 2100 um 3,7 ... 4,8 °C ansteigen. Dies birgt immense Risiken für Mensch und Natur [5].

Zur Reduktion der CO_2 -Emissionen sollen fossile Energieträger durch erneuerbare ersetzt werden. Laut dem sechsten Monitoring-Bericht zur Energiewende des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) [6] soll der Anteil erneuerbarer Energie am Bruttostromverbrauch bis 2050 mindestens 80 % betragen. Problematisch ist, dass die aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung stehende Energie starken Schwankungen, beispielsweise in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung oder der Windenergieleistung, unterliegt, was eine Zwischenspeicherung erforderlich macht. Die Weiterentwicklung von Energiespeichern wird durch die Bundesregierung im Rahmen der Hightech-Strategie 2025 in zahlreichen Projekten gefördert [7]. Potentielle Energiespeichersysteme sollten skalierbar, wirtschaftlich und umweltfreundlich sein. Die ZLFB

kann perspektivisch die genannten Anforderungen erfüllen, wodurch sie als großskaliger Speicher zur Stabilisierung des Stromnetzes geeignet wäre [2, 8]. Im Fall der ZLFB liegt der Energieträger in Form einer Suspension aus mikroskopischen Zinkpartikeln (Partikeldurchmesser im Bereich einiger 10 µm) in einer wässrigen Kaliumhydroxid Lösung vor. Zur Bereitstellung von Energie wird diese Suspension durch eine elektrochemische Zelle gepumpt. Um ein Absinken der Partikel zu verhindern, wird der Suspension ein Verdickungsmittel zugesetzt. In Abbildung 1.1 ist der Strömungskanal schematisch abgebildet. Die Anodenreaktion (Oxidation von Zink) findet bei der Entladung auf der Oberfläche der Zinkpartikel statt und ein Stromfluss kommt nur zu Stande, wenn eine leitende Verbindung der Partikel zum Stromabnehmer besteht. Der Vorteil der ZLFB gegenüber anderen Batteriespeichern ist, dass das aktive Material Zink günstig und in großem Maß vorhanden ist [9]. Aufgrund der Ausführung als Flussbatterie wird außerdem eine Trennung von gespeicherter Energie und elektrischer Leistung ermöglicht, um so deren Skalierung unabhängig zu dimensionieren. Zusätzlich soll durch die fließende Suspensionselektrode die Entstehung von Zinkdendriten beim Aufladen vermieden werden, was eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Rezyklierbarkeit von Zink-Luft-Energiespeichern ist [10].

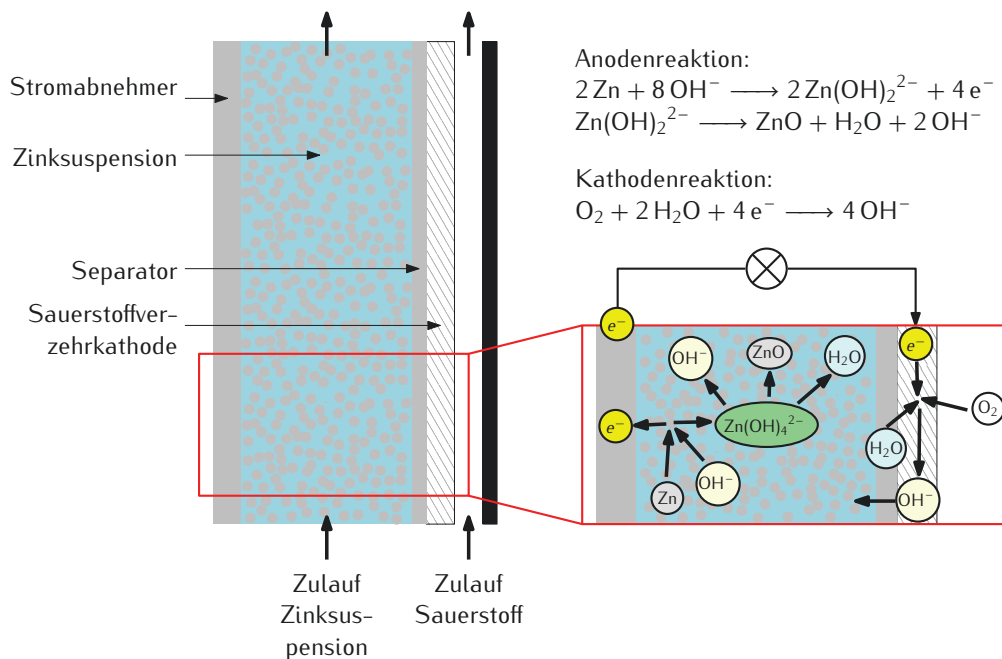


Abbildung 1.1: Elektrochemische Zelle einer ZLFB mit den für den Zellbetrieb (Entladung) relevanten chemischen Reaktionen.

Für einen großflächigen wirtschaftlichen Einsatz muss die ZLFB optimiert werden [11]. Hinsichtlich der Anodenseite der Batterie besteht Optimierungsbedarf bezüglich folgender wesentlicher Aspekte:

- **Prävention von Totzonen:** Bei der im Anodenkanal stattfindenden Oxidation von Zink entsteht Zinkoxid (ZnO). Bilden sich im Strömungskanal Totzonen, in denen nahezu keine Strömung auftritt, so kommt es zu einer Ablagerung und Verfestigung des entstehenden Zinkoxids und der Zinkpartikel. Dies führt zunächst zu einer Verengung des Strömungskanals. Kommt es beim weiteren Anwachsen der Ablagerung zu einer vollständigen Verstopfung des Kanals, kann die Zelle nicht mehr betrieben werden. Derartige Gebiete geringer Strömungsgeschwindigkeit müssen daher vermieden werden [12].
- **Optimierung der erzielten Leistungsdichte bei der Entladung:** Die aktive Anodenoberfläche, welche maßgebend für die elektrische Leistungsdichte ist, wird durch die dynamisch hergestellten Kontakte zwischen den Partikeln und dem Stromabnehmer definiert. Die Kontaktierung der Partikel kann wiederum von den lokalen Strömungsphänomenen und besonders vom Strömungsprofil zwischen Stromabnehmer und Kathode abhängen. Eine Optimierung der elektrischen Leistungsdichte kann somit über die Einstellung einer geeigneten Strömung erfolgen [13].

Die Kenntnis der Strömung ist für die Auslegung der ZLFB folglich von grundlegender Bedeutung. Sowohl die Entstehung von Totzonen als auch die Einstellung einer bezüglich der elektrischen Leistung der Zelle optimalen Strömung hängen einerseits von den fluiddynamischen Eigenschaften der Zinksuspension [14], wie der Rheologie, der Partikelbeladung, der Partikelgrößenverteilung und Partikelform, und andererseits von der Kanalgeometrie ab. Bei der Zinksuspension handelt es sich um ein komplexes mehrphasiges Fluid. Aufgrund des zugesetzten Verdickungsmittels weist die flüssige Phase der Suspension bereits nicht-Newtonsche Eigenschaften auf und es kann zusätzlich ein Wandgleiten auftreten [15]. Durch die Zinkpartikel wird das fluiddynamische Verhalten darüber hinaus komplexer.

Die Untersuchung der Suspensionsströmung kann direkt im technischen Prozess erfolgen, wofür eine In-situ-Strömungsmessung erforderlich ist. Für die Auslegung der Strömungsstrukturen werden zusätzlich Strömungssimulationen genutzt. Dafür werden experimentell validierte numerische Modelle für die Abbildung der Strömung benötigt. Eine messtechnische Erfassung der Suspensionsströmung ist also einerseits für die Messung im Prozess und andererseits für die grundlegende Modellbildung und Validierung von Strömungssimulationen erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher folgende zwei Szenarien betrachtet:

- **Modellexperiment für die strömungsmechanische Modellbildung:** Für die Entwicklung eines strömungsmechanischen Modells der Zinksuspension sind experimentelle Strömungsmessdaten notwendig. Diese sollen anhand der Messung an einem L-förmigen Kanal mit Strömungsumlenkung und -aufweitung generiert werden. Darin lassen sich strömungsmechanische Effekte, wie die Ausbildung von Totzonen, abbilden. Die Größe des zu untersuchenden Bereiches beträgt $20 \times 15 \text{ mm}^2$. Zur Analyse des komplexen Strömungsfeldes wird eine zweidimen-

sionale und zweikomponentige Strömungsmessung mit einer Ortsauflösung von 1 ... 2 mm im Fluidvolumen benötigt.

- **Strömungsuntersuchung in einer aktiven ZLFB:** Um eine Korrelation zwischen Strömung und elektrischer Leistung der ZLFB herzustellen, wird eine Messung der Strömung im Anodenkanal einer aktiven ZLFB benötigt. Das Profil der Hauptströmungskomponente im Anodenspalt zwischen Stromabnehmer und Kathode ist von Interesse, da dieses einen Einfluss auf die elektrische Leistung der Zelle hat. Zur Erfassung ist eine In-situ-Messung mit einer Ortsauflösung von etwa 100 μm bei einer Eindringtiefe von etwa 5 mm erforderlich.

In beiden Fällen soll die Messung nicht invasiv erfolgen, um eine Rückwirkung der Messeinrichtung auf die Strömung bzw. die Funktion der elektrochemischen Zelle zu vermeiden.

Gelingt die Messung der Strömung in den genannten Fällen, könnte einerseits ein wesentlicher Beitrag zum Verständnis der in der ZLFB auftretenden Strömungsvorgänge geleistet werden. Daraus können Kriterien für die Auslegung der ZLFB abgeleitet und somit ein Beitrag zur Weiterentwicklung dieses Batterietyps geleistet werden. Außerdem können die aufgenommenen Strömungsmessdaten zum Kalibrieren und Validieren numerischer Modelle für die Zinksuspension eingesetzt werden, was die Auslegung der Strömungsstruktur der ZLFB mittels Simulation ermöglicht.

1.2 Stand der Technik

Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren zur Messung von Suspensionsströmungen vorgestellt und speziell im Hinblick auf die Eignung zur Messung in der Zinksuspension mit den zuvor genannten Anforderungen diskutiert. Es werden dabei nur nicht invasive Messverfahren diskutiert. Zur Verdeutlichung der Dimensionalität der verschiedenen Messverfahren wird die Anzahl der räumlichen Dimensionen mit D und die der Geschwindigkeit mit C angegeben, z.B. zweidimensional (2D) zweikomponentig (2C).

Standardmäßig werden für die Strömungsmessung in transparenten Fluiden optische Messmethoden wie die Particle Image Velocimetry [16, 17], die Laser-Doppler-Anemometrie [18], die optische Particle Tracking Velocimetry [19] und die Doppler-Global-Velozimetrie (DGV) [20] eingesetzt. Abgesehen von der DGV, wurden diese Verfahren auch für die Strömungsmessung von Suspensionen genutzt [21–23]. Dabei wurde allerdings entweder in sehr niedrig konzentrierten Suspensionen oder in transparenten Suspensionen gemessen. Die Zinksuspension weist eine hohe Partikelbeladung von 8 vol.-% auf und ist dadurch opak. Folglich sind die genannten optischen Methoden nicht für die Messung der Zinksuspensionsströmung geeignet.

Die Magnetresonanz-Velozimetrie (MRV) wurde ebenfalls zur Messung von Suspensionsströmungen eingesetzt [24]. Dabei wird das untersuchte Strömungsfeld in ein starkes externes Magnetfeld gebracht und die Resonanzfrequenz von Protonen und

die Relaxationszeit nach der Anregung gemessen. Die Amplitude des gemessenen Signals hängt von der Protonenzahl ab, welche spezifisch für ein bestimmtes Material ist [25]. Dieser Effekt wird genutzt, um die Verteilung der Materialien bildhaft darzustellen. Mittels korrelationsbasierter Geschwindigkeitsschätzung kann das Strömungsfeld aus nacheinander aufgenommenen Bildern ermittelt werden. Dabei können sehr hohe örtliche Auflösungen im Bereich einiger $10\text{ }\mu\text{m}$ in konzentrierten Suspensionen, beispielsweise mit einem Volumenanteil von 50 % [26], gemessen werden. Als suspendierte Phase werden meistens Kunststoffpartikel genutzt. Strömungsmessungen in Metallpartikelsuspensionen mittels MRV wurden in der Literatur bis jetzt nicht beschrieben. Es ist daher unklar, ob in der Zinksuspension eine Messung mittels MRV möglich ist. Dem steht ein sehr hoher technischer und finanzieller Aufwand gegenüber. Zusätzlich könnte es aufgrund der starken Magnetfelder bei der MRV zu einer Beeinflussung der Strömung in der betriebenen ZLFB kommen. Da Zink ein Metall ist, werden bei der Bewegung der Partikel durch das Magnetfeld Wirbelströme in den Partikeln erzeugt, welche ihrer Ursache, also der Bewegung, entgegenwirken. Somit kommt es zu einer Rückwirkung des Messsystems auf die Strömung. Die MRV ist daher nicht für die Messung der Zinksuspensionsströmung geeignet.

Im Gegensatz zur MRV ist die Elektrische-Impedanz-Spektroskopie (EIS) ein günstiges Messverfahren. Dieses wird für die Untersuchung der Partikeldichte und -verteilung in fließenden Suspensionen verwendet [27, 28]. Das Messprinzip beruht auf der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit von Partikeln und Fluid einer Suspension. Diese wird über eine den Messbereich umschließende Anordnung von Elektroden ermittelt. Die Darstellung einzelner Partikel in der Suspension und eine Strömungsmessung sind herausfordernd, da die EIS eine geringe Ortsauflösung aufweist. Diese lässt sich für eine typische Elektrodenanordnung in einem Ring mit etwa 3... 10 % des Ringdurchmessers abschätzen [29], hängt allerdings stark von den Leitfähigkeitsunterschieden ab. Da es sich um ein tomografisches Verfahren handelt, ist eine Zugänglichkeit zum Messvolumen von allen Seiten erforderlich, welches für die Untersuchung an der ZLFB nicht gegeben ist. Die EIS ist daher nicht für die Messung der Zinksuspensionsströmung geeignet.

Für die Untersuchung von Suspensionen werden tomografische Bildgebungsverfahren auf der Basis ionisierender Strahlung eingesetzt [25]. Dazu zählen die Verfahren Neutronen-Tomographie, Positronen-Emissions-Tomographie (PET) [30] und Röntgen-Tomographie [31]. Für die Abbildung der Partikel der Suspension ist ein entsprechender Absorptionskontrast zwischen den Bestandteilen der Suspension (fest, flüssig) nötig. Aus zeitlich nacheinander aufgenommenen Bildern kann mittels korrelationsbasierter Geschwindigkeitsschätzung oder Verfolgung der abgebildeten Partikel die Fluidgeschwindigkeit ermittelt werden. Der Einsatz der Neutronenradiographie für die Messung in der Zinksuspension ist problematisch, da die Dämpfung der Neutronenstrahlung in Wasser (Hauptbestandteil der flüssigen Phase der Zinksuspension) sehr hoch und die Eindringtiefe somit nicht ausreichend ist. Der Einsatz von Röntgenstrahlung ist ebenfalls problematisch, da die Strahlung einerseits gedämpft und andererseits an den Zinkpartikeln reflektiert wird. Die PET wurde bereits erfolgreich zur Strömungsmessung in konzentrierten Suspensionen angewendet [32]. Dabei wurde die

Ortsauflösung in Form der Standardabweichung der Partikelposition von 6 mm angegeben. Diese kann für kleine Partikelgeschwindigkeiten auf 1 mm reduziert werden. Für die PET wird allerdings Gammastrahlung genutzt und es werden spezielle Positronen emittierende Streupartikel benötigt. Damit ist das Verfahren sehr aufwändig und kann nur in speziellen Umgebungen mit entsprechendem Strahlenschutz angewendet werden. Für einen dauerhaften Einsatz und eine systematische Untersuchung der Strömung in der ZLFB unter Variation zahlreicher Prozessparameter ist dieses Verfahren daher nicht praktikabel.

Ultraschallmessverfahren stellen eine günstige, strahlungsfreie und einfach handhabbare Alternative zu den genannten Verfahren dar. In der Prozessmesstechnik werden Ultraschallsensoren beispielsweise zur Durchflussmessung mittels Ultraschall-Laufzeitdifferenzverfahren genutzt [33, 34]. In der einfachsten Form werden zwei Ultraschallsensoren versetzt an gegenüberliegenden Seiten des Strömungskanals angeordnet. Es werden nun wechselseitig von den Sensoren Ultraschallpulse ausgesendet und empfangen. Aufgrund des Mitnahmeeffektes ergeben sich stromabwärts und stromaufwärts unterschiedliche Laufzeiten des Ultraschallpulses. Aus der Laufzeitdifferenz kann die integrale Strömungsgeschwindigkeit entlang des Ultraschallpropagationspfades und daraus der Durchfluss bestimmt werden. Zur Erfassung des Strömungsprofils der Hauptströmungskomponente werden mehrere Sender-/Empfängerpaare um den Strömungskanal angeordnet und eine tomografische Rekonstruktion angewendet [35]. Zur Messung eines Strömungsprofils ist folglich eine Zugänglichkeit zum Messvolumen von mehreren Seiten erforderlich. Dies ist für die Messung in der ZLFB nicht gegeben. Außerdem treten aufgrund der Streuung der Ultraschallwelle an den Zinkpartikeln starke Störungen im empfangenen Signal auf. In der vorliegenden Arbeit werden Fluidgeschwindigkeiten bis maximal 30 mm s^{-1} betrachtet. Die daraus resultierende Laufzeitdifferenz ist klein gegenüber den Laufzeitveränderungen, die durch die Zinkpartikel eingebracht werden. Entsprechend ist die zu erwartende Messunsicherheit sehr groß. Die Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV) erlaubt, im Gegensatz zum Ultraschall-Laufzeitdifferenzverfahren, die Messung eines Strömungsprofils mit nur einem akustischen Zugang. Dabei wird der akustische Doppler-Effekt ausgenutzt: Bei der Reflexion einer Ultraschallwelle an einem bewegten Objekt weist das gestreute Signal eine Dopplerfrequenzverschiebung auf, woraus die Geschwindigkeit des Objektes bestimmt werden kann. Bei Aussendung eines kurzen Ultraschallpulses kann somit eine linienhafte Messung der Strömungsgeschwindigkeit in Schallausbreitungsrichtung erfolgen [36]. Werden mehrere Ultraschallwandler nebeneinander in einem Array angeordnet, kann eine flächige Erfassung einer Strömungskomponente (2D1C) erfolgen. Eine Messung der zweiten Geschwindigkeitskomponente (2D2C) ist über die orthogonale Anordnung eines zweiten Arrays möglich [37]. Mit dieser Technik konnte das 2D2C-Strömungsfeld bei Modellexperimenten zur Kristallzucht erfolgreich vermessen werden [38], wobei Ortsauflösungen von etwa 10 mm bei einer Ultraschallfrequenz von 8 MHz erreicht wurden. Um die geforderte örtliche Auflösung für die Messung der Zinksuspensionsströmung von 1 ... 2 mm zu erreichen, wären Ultraschallpulse mit einer Frequenz von schätzungsweise $f > 50 \text{ MHz}$ erforderlich. Bei dieser Frequenz kann die geforderte Eindringtiefe von 20 mm aufgrund der starken Streuung bzw. Reflexion der Schallwelle an

den Zinkpartikeln nicht erreicht werden.

Zur Verbesserung der örtlichen Auflösung bei gleicher Ultraschallfrequenz, kann die Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV) mit dem Phased-Array-Prinzip kombiniert werden [39]. Das Phased-Array-Prinzip erlaubt die elektrische Fokussierung des Schallfeldes durch die Überlagerung von geeignet phasenverzögerten Elementarwellen. Auf diese Weise kann bei gleicher Frequenz eine bessere örtliche Auflösung erreicht werden als bei einem konventionellen Ultraschallwandler. Zur Erfassung beider Geschwindigkeitskomponenten in einer Messebene mit einem akustischen Zugang existieren zahlreiche Verfahren, wie beispielsweise das Crossed-Beam-Verfahren [40]. Dieses Verfahren ist prinzipiell geeignet, die Strömung im Modellexperiment zu erfassen. Eine Anwendung des Doppler-Verfahrens in Kombination mit dem Phased-Array-Prinzip auf relevante Suspensionsströmungen wurde bis jetzt allerdings nicht demonstriert. Ein alternatives ultraschallbasiertes Messverfahren für die 2D2C-Strömungsmessung ist die Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie) (UIV) [41]. Es werden zunächst Intensitätsbilder, sogenannte B-Modes, aus dem Fluid aufgenommen. Dazu wird ebenfalls das Phased-Array-Prinzip genutzt. Über die Korrelation nacheinander aufgenommener Bilder kann die Geschwindigkeit in der Messebene ortsabhängig bestimmt werden. Dieses Verfahren wurde bereits erfolgreich zur Messung von Suspensionsströmungen eingesetzt, beispielsweise zur Messung der Blutströmung ohne Kontrastmittel [42] oder für technische Anwendungen zur Charakterisierung von Turbulenz [43] und für die Rheometrie [44]. Die untersuchten Fluide unterscheiden sich jedoch stark von der Zink suspension, da die physikalischen Eigenschaften wie die Dichte der suspendierten und flüssigen Phase, der Volumenanteil der Partikel sowie die Größe der Partikel unterschiedlich sind. Daraus folgen unterschiedliche Schallausbreitungseigenschaften (z.B. Streuung, Dämpfung) und somit eine andere Eindringtiefe sowie andere Bildgebungseigenschaften. Es muss somit eine Anpassung an die Zinksuspension vorgenommen werden.

Für die Messung der Suspensionsströmung im Modellexperiment konnten folglich zwei potentielle Verfahren identifiziert werden: die UDV und die UIV jeweils in Kombination mit dem Phased-Array-Prinzip. Die zu erwartenden örtlichen Auflösungen für beide Verfahren liegen im Bereich von 1 ... 2 mm.

Für eine Messung der Strömung in der betriebenen ZLFB wird allerdings eine Ortsauflösung von $\leq 100 \mu\text{m}$ gefordert, da aufgrund der nicht-Newtonschen Rheologie sehr große Gradienten im Geschwindigkeitsfeld auftreten. Bei Anwendung der UDV oder UIV müssten Ultraschallfrequenzen von mindestens $f = 50 \text{ MHz}$ genutzt werden, um diese Ortsauflösung zu erreichen. Dies entspricht einer Wellenlänge von $40 \mu\text{m}$ und damit etwa dem mittleren Durchmesser der Zinkpartikel in der Suspension. Die Ultraschallwelle wird bei dieser Frequenz an den Partikeln nicht mehr gestreut, sondern größtenteils reflektiert. Die geforderte Eindringtiefe kann also nicht erreicht werden, da der Ultraschall an den oberflächlichen Partikeln reflektiert wird. Die Herausforderung besteht demnach darin, eine hohe Ortsauflösung bei ausreichend geringer Ultraschallfrequenz zu erreichen, so dass die Ultraschallwelle die Zinksuspension noch durchdringen kann.

Das Beugungslimit stellt die fundamentale Grenze für die erreichbare Ortsauflösung eines abbildenden Systems dar, wobei die Ultraschallfrequenz indirekt proportional zur Ortsauflösung ist. Folglich ist die Ortsauflösung durch die genutzte Ultraschallfrequenz limitiert. Die Ultrasound Localization Microscopy [45] stellt ein medizinisches Ultraschallbildgebungsverfahren dar, dessen Ortsauflösung nicht durch das Beugungslimit begrenzt ist. Nichtlineare Streukörper werden mittels Ultraschallbildgebung abgebildet und deren Position mit einer Genauigkeit unterhalb des Beugungslimits bestimmt. Anschließend kann eine Verfolgung vorgenommen werden, um die Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen. Bei diesem Verfahren kann eine hohe Ortsauflösung bei vergleichsweise geringer Ultraschallfrequenz erreicht werden. Für die Messung der Zinksuspensionsströmung könnte so eine ausreichende Eindringtiefe und gleichzeitig hohe Ortsauflösung erreicht werden. Aufgrund der starken Streuung der Ultraschallwelle an den Zinkpartikeln, kann die Ultrasound Localization Microscopy allerdings nicht ohne Weiteres in der Zinksuspension angewendet werden.

1.3 Lösungsansatz und Struktur der Arbeit

Derzeit ist kein Messverfahren bekannt, welches die genannten Anforderungen erfüllt und eine Strömungsmessung in der Zinksuspension ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher folgende Ziele verfolgt:

- **Untersuchung neuartiger ultraschallbasierter Strömungsmessverfahren zur 2D2C-Strömungsmessung in einem Modellexperiment:** Um die zuvor genannten messtechnischen Anforderungen für die Messung am Modellexperiment zu erfüllen, sollen bekannte Ultraschallströmungsmessverfahren für homogene Fluide bezüglich ihrer Eignung zur Messung in der Zinksuspension untersucht werden. Dazu zählen die UDV und die UIV. Das als geeignet identifizierte Verfahren wird anschließend für die Messung in der Zinksuspension angepasst, charakterisiert und anschließend angewendet.
- **Entwicklung und Charakterisierung eines neuartigen ultraschallbasierten Strömungsmessverfahrens zur Untersuchung des Strömungsprofils in einer aktiven ZLFB:** Die besondere Herausforderung bei der Messung in der betriebenen ZLFB besteht in der hohen geforderten Ortsauflösung. Ein üblicher Ansatz, diese zu erreichen, ist eine Erhöhung der Ultraschallfrequenz. Dieser Ansatz ist für die Messung in der Suspension nicht möglich, da die Ultraschallwelle für hohe Frequenzen nicht mehr in die Partikelsuspension eindringt. Es wird daher ein neuartiger Ansatz aus der medizinischen Ultraschallbildgebung, die Ultrasound Localization Microscopy, verwendet. Diese ermöglicht eine hohe Ortsauflösung bei geringer Ultraschallfrequenz, so dass die Ultraschallwelle in die Suspension eindringen kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verfahren erweitert, um die Anwendung in stark streuenden Suspensionen zu ermöglichen.

Zur Unterstützung des grundlegenden Verständnisses werden in Kapitel 2 für die Arbeit wesentliche Begriffe und Verfahrensweisen eingeführt. In Kapitel 3 werden an-

schließlich die experimentellen Grundlagen vorgestellt. Dabei wird zunächst die Charakterisierung der akustischen Eigenschaften der Zinksuspension dargestellt und anschließend die verwendete Messtechnik beschrieben. Zur verwendeten Messtechnik gehört das Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter (PAUDV), welches für die Aussendung und Aufnahme der Ultraschallsignale genutzt wird, sowie die für die Arbeit verwendeten Ultraschall-Arrays. In Kapitel 4 wird die Strömungsuntersuchung am Modellexperiment vorgestellt. Dazu wird der experimentelle Aufbau dargestellt und untersucht, welchen Effekt die Partikel der Zinksuspension auf die Schallausbreitung haben. Entsprechend kann anschließend ein geeignetes Geschwindigkeitsmessverfahren für die Strömungsmessung ausgewählt, charakterisiert und zur Strömungsmessung angewendet werden. Abschließend erfolgt ein Vergleich der gemessenen Strömung mit den Ergebnissen einer numerischen Strömungssimulation. Im Anschluss wird in Kapitel 5 das Messverfahren für die Strömungsuntersuchung in einer aktiven ZLFB vorgestellt. Wie im vorangegangenen Kapitel wird zunächst der experimentelle Aufbau beschrieben und die Anforderungen an das Messverfahren dargelegt. Ausgehend von der Ultrasound Localization Microscopy werden die für die Anwendung in der Zinksuspension notwendigen Erweiterungen beschrieben. Das Messverfahren wird anschließend charakterisiert und die Ergebnisse der Strömungsmessung an einer aktiven ZLFB vorgestellt. Schließlich folgt in Kapitel 6 eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit und ein Ausblick auf weiterführende Untersuchungen.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendigen theoretischen Grundlagen eingeführt. Dazu werden in Abschnitt 2.1 zunächst einige wesentliche Begriffe und Beziehungen zur Schallausbreitung in Suspensionen erläutert. In Abschnitt 2.2 erfolgt eine Beschreibung der Ultraschallbildgebung nach dem Phased-Array-Prinzip. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 2.3 die verwendeten Strömungsmessverfahren vorgestellt. Abschließend wird die nichtlineare Ultraschallbildgebung (Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung) (HI)) beschrieben (siehe Abschnitt 2.4).

2.1 Grundlagen der Schallausbreitung

In diesem Abschnitt wird zunächst die Schallausbreitung in homogenen Medien beschrieben (Abschnitt 2.1.1). Davon ausgehend werden anschließend Besonderheiten bei der Schallausbreitung in inhomogenen Medien und im Speziellen in Suspensionen dargelegt (Abschnitt 2.1.2).

2.1.1 Schallausbreitung in homogenen Medien

Schall ist eine mechanische Welle, die sich in elastisch verformbaren Medien ausbreitet, also eine sich fortpflanzende Verformung des Übertragungsmediums [46]. Durchläuft eine solche Welle ein Material so oszillieren dessen Moleküle um ihre Ruhelage mit der Geschwindigkeit v_{schnelle} , welche auch als Schallschnelle bezeichnet wird. Der zeitliche Abstand zweier gleichphasiger Zustände eines Moleküls kann durch die Periodendauer T bzw. mit der Frequenz f als $T = \frac{1}{f}$ beschrieben werden. Der örtliche Abstand zweier gleichphasiger Zustände zu einem festen Zeitpunkt kann dagegen über die Wellenlänge λ beschrieben werden. Für homogene Medien kann über die Schallgeschwindigkeit c des Mediums ein Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Periodendauer hergestellt werden:

$$\lambda = c \cdot T \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{c}{f}. \quad (2.1)$$

Schall mit einer Frequenz f oberhalb der menschlichen Hörgrenze von $f > 20 \text{ kHz}$ wird als Ultraschall bezeichnet.

Abhängig vom Übertragungsmedium sind verschiedene mechanische Wellentypen ausbreitungsfähig, wobei für die vorliegende Arbeit Longitudinalwellen und Transversalwellen relevant sind:

- **Longitudinalwellen** sind Druckwellen, bei welchen die Ausbreitungsrichtung und die Richtung der Moleküloszillation gleich sind.

- **Transversalwellen** sind Scherwellen, bei welchen die Ausbreitungsrichtung und die Richtung der Moleküloszillation senkrecht zueinander stehen.

Longitudinalwellen sind sowohl in Fluiden als auch Feststoffen ausbreitungsfähig. Ihre Schallgeschwindigkeit kann für Fluide mit dem Kompressionsmodul K und der Dichte ρ berechnet werden als:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (2.2)$$

Für die Ausbreitung von Transversalwellen ist ein Schubmodul größer Null notwendig. Sie sind daher nur in Festkörpern ausbreitungsfähig.

Zur Beschreibung der Ausbreitung einer Welle wird der Schalldruck p genutzt. Für ein ideales, dämpfungsfreies Medium mit zeitlich nicht veränderlichen Eigenschaften kann die Wellengleichung für den Schalldruck angegeben werden als [47]:

$$\nabla^2 \cdot p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (2.3)$$

wobei ∇ den Nabla-Operator und t die Zeit darstellen. Die einfachste Lösung der Wellengleichung ist eine eindimensionale ebene Welle, welche durch

$$p(x, t) = \hat{p} \cos(\omega t - kx) \quad (2.4)$$

dargestellt werden kann. Dabei beschreibt $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz und $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ die Wellenzahl. Über die Bewegungsgleichung

$$\rho \frac{\partial v_{\text{schnelle},x}}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.5)$$

kann die Schallschnelle $v_{\text{schnelle},x}$ in x -Richtung abgeleitet werden:

$$v_{\text{schnelle},x} = \frac{1}{\rho c} p. \quad (2.6)$$

Aus diesem Zusammenhang wird die spezifische akustische Impedanz Z_0 für ein homogenes Medium definiert als:

$$Z_0 = \rho c. \quad (2.7)$$

Die spezifische akustische Impedanz ist ein wichtiger Parameter für die Beschreibung der Ausbreitung von akustischen Wellen. Für homogene Medien hängt sie nur von den Materialparametern Dichte ρ und Schallgeschwindigkeit c ab.

Trifft eine akustische Welle auf eine Grenzfläche, an der sich die physikalischen Eigenschaften des Ausbreitungsmediums ändern, kommt es zu einer teilweisen Reflexion und Transmission der Schallenergie. Welcher Teil des Schalldrucks reflektiert wird, ist durch den Reflexionskoeffizienten Γ beschrieben und kann mit Hilfe der akustischen Impedanzen $Z_{0,1}$ und $Z_{0,2}$ der beiden Medien berechnet werden [47]:

$$\Gamma = \left(\frac{Z_{0,2} - Z_{0,1}}{Z_{0,2} + Z_{0,1}} \right) \quad (2.8)$$

Bei der Ausbreitung in einem nicht idealen Medium unterliegt eine akustische Welle einer Dämpfung, welche durch den Dämpfungskoeffizienten α beschrieben werden kann. In einem homogenen Medium wird diese vorwiegend durch Dissipation (Umwandlung in thermische Energie) hervorgerufen [47].

2.1.2 Schallausbreitung in inhomogenen Medien

Medien werden im akustischen Sinne als inhomogen bezeichnet, wenn die akustisch relevanten Materialeigenschaften wie Schallgeschwindigkeit und Dichte vom Ort abhängig sind. Dies tritt bei sogenannten Dispersionen auf, welche im Allgemeinen ein heterogenes Gemisch aus mindestens zwei Stoffen darstellen. Eine Dispersion besteht dabei immer aus einer suspendierten und einer kontinuierlichen Phase. Ist die kontinuierliche Phase ein Fluid und die suspendierte Phase ein Feststoff, so spricht man von einer Suspension. Die Betrachtung der Schallausbreitung in inhomogenen Medien bezieht sich in der vorliegenden Arbeit ausschließlich auf Suspensionen.

Bei der Interaktion von Schallwellen mit Partikeln in einem Fluid kommt es zu Effekten, welche Einfluss auf die Dämpfung, Schallgeschwindigkeit und spezifische akustische Impedanz der Suspension haben und im Allgemeinen frequenzabhängig sind. Die akustischen Eigenschaften einer Suspension unterscheiden sich unter Umständen also sehr stark von denen der einzelnen kontinuierlichen Phase. Die für die Betrachtung von Suspensionen relevanten Effekte sind: Streuung, Mehrfachstreuung, thermische Streuung und viskoinertiale Streuung [1].

Als **Streuung** wird die ungerichtete Umlenkung der Ultraschallwelle an einem Hindernis oder Streuer bezeichnet. Die Intensität der Streuung hängt vom Verhältnis der Wellenlänge zum Streuerdurchmesser ab. Für Streuobjekte die wesentlich kleiner als die Wellenlänge sind, geht die Frequenz mit f^2 bis f^6 in die Streuintensität ein [46]. Nähert sich die Wellenlänge den Dimensionen der Streukörper, so geht die Streuung in die Reflexion über und die Ultraschallwelle dringt nicht in die Suspension ein. Die ungerichtete Streuung entzieht der Welle Energie und trägt damit zur Dämpfung der Welle bei.

Mehrfachstreuung beschreibt die Streuung einer bereits gestreuten Ultraschallwelle an einem anderen Streupartikel. Wie auch bei der einfachen Streuung hängt die Amplitude der gestreuten Welle vom Kontrast der Kompressibilität von kontinuierlicher und suspendierter Phase ab. Dieser Effekt ist bei hohen Volumenanteilen ab etwa 10 % der suspendierten Phase relevant [48].

Thermische Streuung entsteht aufgrund von Temperaturfluktuationen bei der Ausbreitung der akustischen Druckwelle [1]. Lokale Druckschwankungen führen zu einer zyklischen lokalen Erwärmung und Abkühlung. Unterscheiden sich Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient oder spezifische Wärmekapazität der kontinuierlichen und suspendierten Phase, so ist die zyklische Temperaturänderung im suspendierten Partikel ungleich der im Fluid. In der Folge kommt es zu einer Erwärmung und Abkühlung eines Randbereiches um das suspendierte Partikel durch das Partikel selbst. Dies wiederum führt zur zyklischen Expansion und Kontraktion dieses Randbereiches und

es entsteht eine Monopolschallquelle mit gleicher Frequenz aber ungleicher Phasenlage gegenüber der Anregungswelle. Aufgrund der thermischen Streuung kommt es zu einer Abschwächung der akustischen Welle, und sie trägt somit zur Dämpfung bei. Aufgrund der ungleichen Phasenlage kann die thermische Streuung außerdem einen Einfluss auf die Phasengeschwindigkeit der Suspension haben. Wie stark der Einfluss der thermischen Streuung auf die akustischen Eigenschaften der Suspension ist, hängt vom Kontrast der thermischen Eigenschaften der beteiligten Phasen ab.

Viskoinertiale Streuung entsteht aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen kontinuierlicher und suspendierter Phase. Der Trägheitsunterschied der beiden Phasen führt zu einer Relativbewegung zwischen Partikel und Fluid beim Durchschreiten der akustischen Welle. Dies führt zur Ausbildung lokaler Strömungen im Fluid, welche wiederum auf die Relativbewegung von Fluid und Partikel zurückwirken. Aufgrund der Relativbewegung kommt es zu Wärmeverlusten durch Reibung und somit zu einer zusätzlichen Dämpfung der Schallenergie. Die Reaktion des Fluides auf die zyklische Relativbewegung des Partikels führt zur Abstrahlung von Schallenergie in Form einer Dipolquelle, wenn die Wellenlänge gegenüber dem Partikeldurchmesser groß ist. Dies hat wiederum Einfluss auf die Phasengeschwindigkeit und auf die Dämpfung der Suspension. Der Einfluss der viskoinertialen Streuung hängt einerseits vom Dichtekontrast der beteiligten Phasen ab, andererseits aber auch von der Viskosität der flüssigen Phase. Die viskoinertiale Streuung erreicht ein Maximum bei mittleren Viskositäten [49].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die akustischen Eigenschaften Dämpfung, Phasengeschwindigkeit und folglich die spezifische akustische Impedanz einer Suspension von den physikalischen Eigenschaften Dichte, Kompressibilität, thermischer Leitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und dem Wärmeausdehnungskoeffizient der einzelnen Phasen abhängen. Weiterhin entscheidend ist der Volumenanteil sowie Form und Größe der suspendierten Partikel. Da die genannten Streueffekte wellenlängenabhängig sind, sind die akustischen Eigenschaften der Suspension frequenzabhängig. Generell gilt, dass der Anteil der an einem Partikel gestreuten Schallenergie vom Verhältnis der Partikelgröße zur Ultraschallwellenlänge abhängt. Je größer ein Partikel bei konstanter Frequenz, desto stärker die Streuung und je größer die Ultraschallwellenlänge bei konstanter Partikelgröße, desto schwächer die Streuung. Liegt die Ultraschallwellenlänge im Bereich der Partikelgröße so kommt es zur Reflexion und die Schallwelle dringt nicht weiter in die Suspension ein.

2.2 Ultraschall Bildgebung

Ziel der Arbeit ist es, die Strömung der Zinksuspension in einer aktiven Zink-Luft-Flussbatterie (ZLFB) bzw. in einem Modellexperiment zu messen. Um die dafür notwendige Voraussetzung bezüglich der Ortsauflösung zu erfüllen, wird das Phased-Array-Prinzip eingesetzt. Dieses erlaubt die Fokussierung der Ultraschallwelle und wird in Abschnitt 2.2.1 vorgestellt. Durch eine geeignete Ansteuerung kann der Fokuspunkt außerdem in der Messebene verschoben werden. Dadurch wird eine Ultraschallbildgebung ermöglicht, welche die Voraussetzung für die zweidimensionale Erfassung der

Strömungsgeschwindigkeit ist. Wird die Messebene dabei mit dem Ultraschallfokus abgerastert, so ist die erreichbare Bildrate sehr gering. In Abschnitt 2.2.2 wird daher ein Verfahren erläutert welches auf der Aussendung nur einer Ultraschallwelle basiert um ein vollständiges Bild zu erfassen. In 2.2.3 werden abschließend die Grenzen der Schallfeldfokussierung und damit der Bildauflösung vorgestellt.

2.2.1 Phased-Array-Prinzip

Das Huygens'sche Prinzip besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer Elementarwelle (entspricht einer kreis- bzw. kugelförmigen Welle) betrachtet werden kann. Die Wellenfront kann demnach durch die Superposition der einzelnen Elementarwellen dargestellt werden. Eine Elementarwelle entsteht, wenn die Abmessung der Ultraschallquelle kleiner als die halbe Wellenlänge ist.

Ein Phased Array stellt die linienhafte oder flächige Anordnung von Ultraschallwandlerelementen dar. In Abbildung 2.1 ist ein linienhaftes Array schematisch dargestellt. Für den Abstand d_{pitch} gilt:

$$d_{\text{pitch}} < \frac{\lambda}{2}, \quad (2.9)$$

wobei λ die Wellenlänge der Ultraschallwelle darstellt. Aufgrund dieser Bedingung werden durch die Ultraschallelemente in der x-y-Ebene Kreiswellen, also Elementarwellen ausgestrahlt. Durch eine geeignete zeitliche Verzögerung der durch die einzelnen Ultraschallelemente ausgesandten Elementarwellen können somit arbiträre Wellenfronten erzeugt werden. Die verwendeten Zeitverzögerungen werden als delay rules τ_i für das jeweilige Ultraschallelement i bezeichnet. Für eine Fokussierung der Ultraschallwelle auf eine Position \mathbf{x} kann die Zeitverzögerung τ_i mit der Position des jeweiligen Ultraschallelementes \mathbf{x}_i als:

$$\tau_i = \frac{||\mathbf{x} - \mathbf{x}_i||}{c}, \quad (2.10)$$

berechnet werden, wobei c die Schallgeschwindigkeit und $|| \cdot ||$ die euklidische Norm darstellen.

Das Messgebiet kann mit dem Fokus abgerastert und die Rückstreuintensität entsprechend des Ortes aufgetragen werden. Diese Darstellung wird als B-Mode bezeichnet und entspricht der üblichen Darstellung in der medizinischen Ultraschallbildgebung [50].

Wird das Ultraschallfeld beim Aussenden des Pulses fokussiert, spricht man von sendeseitiger Fokussierung, siehe Abbildung 2.2a. Wird die Fokussierung nach dem Empfang der Ultraschallsignale vorgenommen, so spricht man von empfangsseitiger Fokussierung, siehe Abbildung 2.2b. Die empfangenen Signale werden ebenfalls mit τ_i verzögert und anschließend summiert, weshalb die empfangsseitige Fokussierung auch als Delay-and-Sum-Strahlformer (DAS) bezeichnet wird. Im Folgenden wird die Fokussierung des Ultraschalls mittels Phased-Array-Prinzip als Strahlformung bezeichnet.

Für die in dieser Arbeit genutzten linearen Phased Arrays findet eine Fokussierung und Bildgebung nur in der x-y-Ebene statt. Die Ausdehnung der Ultraschallelemente

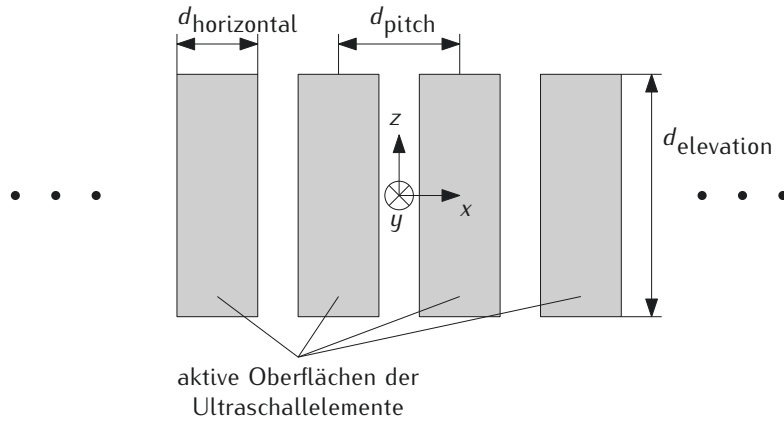


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einiger Elemente eines Ultraschall-Phased-Arrays. Dabei ist die Breite der Ultraschallelemente mit $d_{\text{horizontal}}$, der Abstand zweier Ultraschallelemente in horizontaler Richtung mit d_{pitch} und die Höhe der Ultraschallelemente mit $d_{\text{elevation}}$ bezeichnet.

in z-Richtung $d_{\text{elevation}}$ ist größer. Dadurch bildet sich ein gerichtetes Ultraschallfeld mit einem natürlichen Fokus aus. Die erreichte Ortsauflösung bei der Bildgebung wird also in der x-y-Ebene durch die Phased-Array-Fokussierung und in z-Richtung durch Schallfeld der Ultraschallelemente bestimmt.

2.2.2 Plane wave imaging

Mittels Plane Wave Imaging (dt.: Bildgebung mit einer ebenen Welle) (PWI) kann ein Bild mit nur einer Aussendung einer Ultraschallwelle generiert werden. Dazu wird eine ebene Welle in das Medium ausgesendet. Die gestreuten Ultraschallsignale werden durch alle Elemente des Phased Arrays aufgezeichnet. Anschließend wird für ein Raster an Fokuspunkten eine empfangsseitige Strahlformung vorgenommen. Im Ergebnis liegt für jeden Fokuspunkt das empfangene Signal vor. Daraus kann ein Ultraschallbild (B-Mode) berechnet werden, indem der Effektivwert des Signals in jedem Fokuspunkt als Grauwert interpretiert wird.

2.2.3 Grenzen der Schallfeldfokussierung

Schall ist ein Wellenphänomen und entsprechend unterliegt die Fokussierbarkeit des Feldes dem Beugungslimit. Die erreichbare Fokussierung kann als Full Width at Half Maximum (dt.: Halbwertsbreite) (FWHM) des Fokuspunktes abgeschätzt werden als [46]:

$$FWHM = 1,4 \cdot \frac{cd}{fA}, \quad (2.11)$$

wobei c die Schallgeschwindigkeit des Mediums, d den Abstand des Fokuspunktes zur Apertur des Phased Arrays, f die Frequenz und A die Größe der Apertur angeben. Es

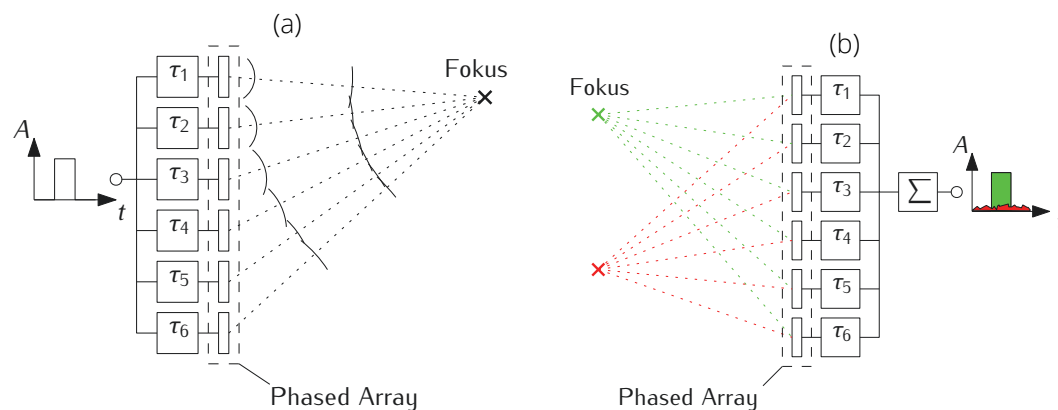


Abbildung 2.2: Vergleich von sendeseitiger und empfangsseitiger Fokussierung für einen Fokuspunkt. (a) Sendeseitige Fokussierung des Ultraschall durch die zeitverzögerte Aussendung der Ultraschallpulse durch die einzelnen Elemente des Phased Arrays. (b) Empfangsseitige Fokussierung durch Überlagerung der zeitverzögerten Empfangssignale. Dabei kommt es zur konstruktiven Überlagerung der Signale aus dem Fokus (grün).

wird ersichtlich, dass die Frequenz antiproportional zur *FWHM* ist. Es ist deshalb ein üblicher Ansatz zur Erhöhung der Ortsauflösung, also Senkung der *FWHM*, die Frequenz zu erhöhen. Dies geht im Allgemeinen mit einer höheren Dämpfung und damit geringeren Eindringtiefe der Ultraschallwelle in das Medium einher.

In diesem Abschnitt wurde beschrieben, wie ein Schallfeld mittels Phased-Array-Prinzip fokussiert und damit eine Bildgebung durchgeführt werden kann. Die aus der Strahlformung resultierenden Signale können dann für eine Geschwindigkeitsschätzung genutzt werden.

2.3 Messung von Strömungsfeldern

In diesem Abschnitt werden Verfahren zur Messung von Strömungsfeldern in Fluiden vorgestellt. Die grundlegenden Strömungsmessverfahren können in folgende zwei Gruppen eingeteilt werden:

- **Doppler-Verfahren:** Die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit basiert auf dem Doppler-Effekt, welcher bei der Streuung von Ultraschallwellen an bewegten Partikeln auftritt, wie bei der Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV), welche in Abschnitt 2.3.1 beschrieben wird.
- **Weg-Laufzeit-Verfahren:** Es erfolgt eine Messung der Ortsänderung eines oder mehrerer Partikel in einem bekannten Zeitintervall, woraus die Geschwindigkeit des Partikels bestimmt werden kann. Die Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.:

Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie) (UIV) sowie die Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (dt.: Ultraschallgeschwindigkeitsmessung mittels Partikelverfolgung) (UPTV) werden in Abschnitt 2.3.2 und 2.3.3 beschrieben.

Allen genannten Messverfahren ist gemein, dass die Ultraschallstreuung an künstlich hinzugefügten oder bereits natürlich vorhandenen Partikeln erfolgt. Es wird demnach die Partikelgeschwindigkeit bestimmt. Sie ist gleich der lokalen Strömungsgeschwindigkeit des Fluides, wenn der Schlupf zwischen Partikel und Fluid sowie die Eigenbewegung der Partikel vernachlässigbar sind. Aufgrund der hohen Viskosität der in dieser Arbeit untersuchten Fluide werden Schlupf und Eigenbewegung im Folgenden vernachlässigt.

2.3.1 Ultraschall-Doppler-Velozimetrie

Die UDV ist ein Verfahren zur Messung von Geschwindigkeiten in Fluiden basierend auf dem Dopplereffekt. Der akustische Dopplereffekt beschreibt, dass es zu einer Dopplereffrequenzverschiebung f_{Doppler} kommt, wenn eine Ultraschallwelle der Mittenfrequenz f an einem Partikel der Geschwindigkeit \mathbf{v} gestreut wird. Die Dopplereffrequenz ist proportional zur Geschwindigkeitskomponente v_s in Schallausbreitungsrichtung und kann wie folgt bestimmt werden:

$$f_{\text{Doppler}} = f \frac{v_s}{c} \quad (2.12)$$

Dabei bezeichnet c die Schallgeschwindigkeit des Fluides. Die Komponente der Partikelgeschwindigkeit in Schallausbreitungsrichtung v_s kann demnach aus der Dopplereffrequenz f_{Doppler} bestimmt werden:

$$v_s = c \frac{2f_{\text{Doppler}}}{f} \quad (2.13)$$

Bei der UDV werden in einem zeitlichen Abstand von f_{prf}^{-1} (prf, pulse repetition frequency) Ultraschallpulse mit N_{periods} Signalperioden bei einer Mittenfrequenz f ausgesendet. Zur Bestimmung der Dopplereffrequenz f_{Doppler} , kann einerseits die Autokorrelationsmethode nach Kasai [51] bzw. die Weiterentwicklung der Korrelationsmethode nach Loupas [52] verwendet werden.

Durch die Kombination von Ultraschallbildgebung (siehe Abschnitt 2.2) und UDV kann ein zweidimensionales (2D) und einkomponentiges Strömungsfeld (Strömungskomponente in Schallausbreitungsrichtung) aufgenommen werden. Soll zusätzlich die zweite Strömungskomponente in der Messebene bestimmt werden, so kann die Crossed-Beam-Technik [53] angewendet werden. Dabei wird das Phased Array in zwei Subaperturen unterteilt und somit jeder Messpunkt aus zwei Richtungen beobachtet. Dies erlaubt über eine geeignete Koordinatentransformation die Bestimmung beider Geschwindigkeitskomponenten in der Messebene. Somit wird eine 2D2C-Messung der Strömungsgeschwindigkeit realisiert.

2.3.2 Ultrasound Imaging Velocimetry

Die UIV ist ein Weg-Laufzeit-Messverfahren zur Erfassung eines 2D2C-Strömungsfeldes. Dazu werden mit einer Wiederholungsfrequenz von f_{prf} Abbildungen der Partikelverteilung (vgl. Ultraschallbildgebung Abschnitt 2.2) im Fluid aufgenommen. Ist die Partikelkonzentration hoch, so entstehen Speckle-Muster aufgrund der Überlagerung der Streusignale dicht nebeneinander liegender Partikel.

Die Abbildungen werden anschließend in kleinere Fenster, sogenannte Interrogation Windows, unterteilt. Mittels Kreuzkorrelation wird für jedes dieser Fenster die Verschiebung $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x, \Delta y)^T$ der abgebildeten Partikel oder Speckle in x- und y-Richtung zwischen aufeinanderfolgenden Bildern bestimmt. Um die Verschiebung mit einer Genauigkeit unterhalb der Auflösung der verwendeten Bildern zu bestimmen, wird eine Subpixel-Interpolation genutzt [41, 54]. Aus der Verschiebung kann die mittlere Geschwindigkeit des Fluides zwischen den Aufnahmezeitpunkten als:

$$\mathbf{v} = (v_x, v_y)^T = \frac{\Delta \mathbf{x}}{\Delta t} \quad (2.14)$$

bestimmt werden. Dabei gilt $\Delta t = f_{\text{prf}}^{-1}$. Die erreichte Ortsauflösung des Geschwindigkeitsfeldes wird durch die Fenstergröße bestimmt. Bei hohen Geschwindigkeiten verlässt ein großer Teil der Strukturen aus dem ersten Bild das Interrogation Window, was zu einer Verbreiterung der Korrelationsfunktion und somit zu einer erhöhten Messunsicherheit führt. Um diesen Loss-of-Pairs-Effekt zu reduzieren, wird die Größe des Interrogation Windows im zweiten Bild jeweils doppelt so groß gewählt wie im ersten [16]. Für die Geschwindigkeitsschätzung werden Algorithmen aus der optischen Particle Image Velocimetry (dt.: Partikelbild-Velozimetrie) (PIV) verwendet. Diese wurden in der Literatur vielfach beschrieben und untersucht [55–57]. Es wird daher an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung der Algorithmen verzichtet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Geschwindigkeitsschätzung mittels OpenPIV [58] vorgenommen.

Zur Reduktion der Messunsicherheit werden n_{epf} (number of emission per profile) Ultraschallbilder für die Berechnung eines Geschwindigkeitsfeldes genutzt. Nacheinander aufgenommene Bilder werden korreliert und die Verschiebung $\Delta \mathbf{x}$ anhand des Mittelwertes der Korrelationsfunktionen bestimmt.

2.3.3 Ultrasound Particle Tracking Velocimetry

Die UPTV ist ebenfalls ein Weg-Laufzeit-Messverfahren zur Erfassung eines 2D2C-Strömungsfeldes in Fluiden [59, 60]. Analog zur UIV werden zunächst Abbildungen der Partikelverteilung im Fluid mit der Wiederholrate f_{prf} erfasst. Anschließend erfolgt eine zweistufige Signalauswertung: zunächst werden Partikel in den Abbildungen lokalisiert. In einem zweiten Schritt werden die gefundenen Partikel in aufeinanderfolgenden Aufnahmen zu Trajektorien zusammengeführt. Die mittlere Geschwindigkeit eines Partikels i auf einer Trajektorie $\mathbf{x}_i(t) = (x_i(t), y_i(t))^T$ kann mit dem bekannten Zeitintervall

$\Delta t = \frac{1}{f_{\text{prf}}}$ wie folgt bestimmt werden:

$$\mathbf{v}_i(t) = (v_{x,i}, v_{y,i})^T = \frac{\mathbf{x}_i(t + \Delta t) - \mathbf{x}_i(t)}{\Delta t} \quad (2.15)$$

Im Ergebnis stehen 2D2C-Geschwindigkeitsinformationen zur Verfügung, welche allerdings örtlich nicht diskretisiert sind. Prinzipiell können mit der UPTV sehr hohe Ortsauflösungen für das Geschwindigkeitsfeld erreicht werden. Dafür ist die Erkennung einzelner isolierter Streukörper notwendig.

2.4 Nichtlineare akustische Effekte

2.4.1 Beschreibung von Linearität

Die Ausbreitung und Reflexion von Ultraschall wird signaltheoretisch im Allgemeinen als linearer Prozess betrachtet. Das bedeutet es werden folgende Bedingungen erfüllt :

$$r_a \{g r_e(t)\} = g \cdot r_a \{r_e(t)\} \quad (2.16)$$

$$r_a \{r_{e1}(t) + r_{e2}(t)\} = r_a \{r_{e1}(t)\} + r_a \{r_{e2}(t)\} \quad (2.17)$$

Dabei stellt $r_a \{r_e(t)\}$ die Systemantwort zu einem zeitabhängigen Eingangssignal $r_e(t)$, g einen konstanten Faktor und $r_{e1}(t)$ und $r_{e2}(t)$ beliebige zeitabhängige Eingangssignale dar. Der Ausdruck in Gleichung 2.16 beschreibt, dass eine Skalierung des Eingangssignals um einen konstanten Faktor zu einer Skalierung der Systemantwort um den gleichen Faktor führt. In Gleichung 2.17 wird ausgedrückt, dass eine Linearkombination der Eingangsgrößen der Linearkombination der Systemantwort der einzelnen Eingangsgrößen entspricht.

Anhand eines einfachen Beispiels soll die Linearität bezüglich der Streuung von Ultraschall dargestellt werden. Betrachtet wird eine monofrequente Ultraschallwelle der Frequenz f . Wird diese an einem Partikel gestreut und ist diese Streuung linear, so besteht das gestreute Signal ebenfalls nur aus der Frequenz f . Es werden keine weiteren Signalanteile bei anderen Frequenzen generiert.

2.4.2 Interaktion von nichtlinearen Streupartikeln und Schallwelle

Die Linearitätsannahme ist eine Näherung, welche in der Realität nur über einen eingeschränkten Parameterbereich gültig ist. So ist die Streuung von Ultraschall an einem Feststoffpartikel in einem Fluid über einen großen Schalldruckbereich linear. Im Gegensatz dazu ist die Streuung an Mikrobläschen [61], welche in der medizinischen Bildgebung als Ultraschallkontrastmittel genutzt werden, schon bei geringen Schalldruckpegeln nichtlinear. Daher werden diese als nichtlineare Streupartikel bezeichnet. Die Mikrobläschen bestehen aus einer Lipidhülle, welche mit einem Gas gefüllt ist und haben eine Größe von einigen Mikrometern. Aufgrund des Kompressibilitätsunterschieds

zwischen Gas und umgebendem Fluid, kommt es beim Durchschreiten der Ultraschallwelle zu einer zyklischen Expansion und Kontraktion der Mikrobläschen. Die auftretende Rückstellkraft bei diesem Schwingungsvorgang ist nichtlinear vom Radius des Bläschens abhängig und unterscheidet sich für die Expansions- und Kontraktionsphase. Diese Asymmetrie in der Pulsation führt zu einer Asymmetrie der gestreuten Ultraschallwelle. Dadurch entstehen höhere Harmonische des Anregungssignals und der Streuprozess ist damit nichtlinear. In Abbildung 2.3 soll die Entstehung höherer Harmonischer anhand der schematischen Darstellung der Amplitudenspektren von Anregungssignal und gestreutem Signal für eine lineare und eine nichtlineare Streuung verdeutlicht werden.

Die Amplitude der höheren Harmonischen bei der nichtlinearen Streuung hängt von folgenden Parametern ab [61]:

- **Schalldruck der einfallenden Welle:** Je größer der Schalldruck der einfallenden Welle ist, desto größer ist die Amplitude der Pulsation der Mikrobläschen und desto größer ist die Amplitude der entstehenden höheren Harmonischen.
- **Physikalische Eigenschaften der Mikrobläschen:** Die Pulsation der Mikrobläschen kann vereinfacht als gedämpftes Feder-Masse-System betrachtet werden. Demnach weist das System mindestens eine Resonanzfrequenz auf. Diese wird maßgeblich durch die Kompressibilität des Gases, die Steifigkeit der Hülle und die Größe der Mikrobläschen bestimmt. Werden die Mikrobläschen bei ihrer Resonanzfrequenz angeregt, so lassen sich schon bei geringen Schalldruckpegeln starke Nichtlinearitäten beobachten.
- **Physikalische Eigenschaften des umgebenden Fluides:** Die auftretende Nichtlinearität ist außerdem von der Dichte, Viskosität und den thermischen Eigenschaften des umgebenden Fluides abhängig. Außerdem spielt der statische Druck im Fluid eine wesentliche Rolle.

Zur Beschreibung der Schwingung von Mikrobläschen existieren vielfältige Modelle, über welche eine Abschätzung der Resonanzfrequenz möglich ist [61]. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Auswahl der richtigen Mikrobläschen, von der eingesetzten Ultraschallfrequenz, als auch den Eigenschaften des Fluides in welchem sie eingesetzt werden sollen, abhängt.

2.4.3 Harmonic Imaging

Werden für eine Bildgebung die nichtlinearen Effekte der Mikrobläschen ausgenutzt, so wird dies als Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung) (HI) bezeichnet [62]. Dadurch wird eine Trennung der Abbildung von linearen Streupartikeln und nichtlinearen Streupartikeln ermöglicht. Dies wird exemplarisch in Abbildung 2.4 verdeutlicht. In einem Fluid sind lineare und nichtlineare Streupartikel vorhanden. Mittels PWI (vgl. Abschnitt 2.2.2) wird nun eine Abbildung dieser Partikel vorgenommen. Wird dazu

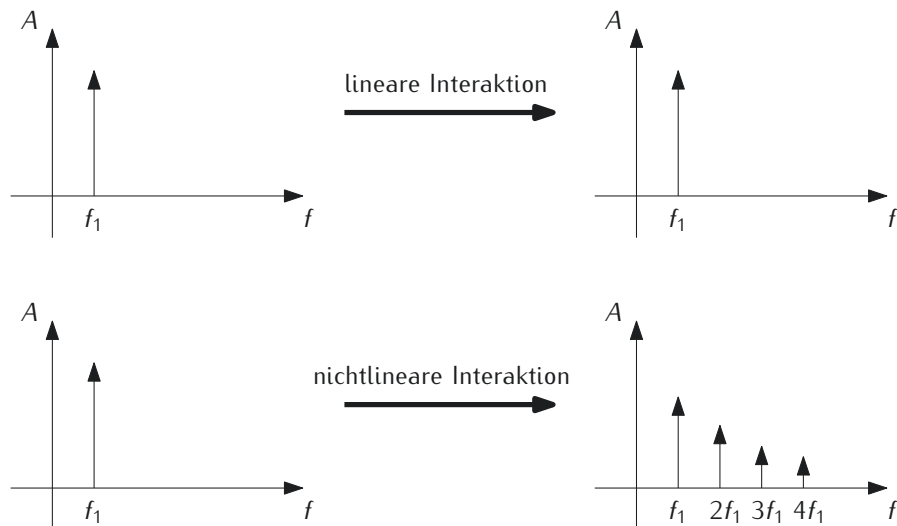


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Amplitudenspektren des Anregungssignals (links) und des gestreuten Signals (rechts) für einen linearen und einen nichtlinearen Streuprozess. Aufgrund der nichtlinearen Interaktion entstehen höhere Harmonische des Anregungssignals bei ganzzahligen Vielfachen der Anregungsfrequenz.

das empfangene Signal bei der Anregungsfrequenz ausgewertet (konventionelle Bildgebung), so sind alle Partikel sichtbar. Werden allerdings nur die Vielfachen der Grundfrequenz ausgewertet (HI), so sind nur die nichtlinearen Streupartikel sichtbar und alle anderen Partikel werden ausgeblendet.

Das HI hat einige Vorteile gegenüber der konventionellen Bildgebung. So können einerseits störende Reflexionen an Impedanzsprüngen oder unerwünschte Streuungen unterdrückt und ausgeblendet werden. Außerdem wird durch die Verwendung höherer Harmonischer die Ortsauflösung gesteigert. Diese hängt von der Frequenz des Ultraschalls ab. Wird also beispielsweise die zweite Harmonische, welche die doppelte Frequenz des Anregungssignals aufweist, ausgewertet, so ist auch die Ortsauflösung verdoppelt.

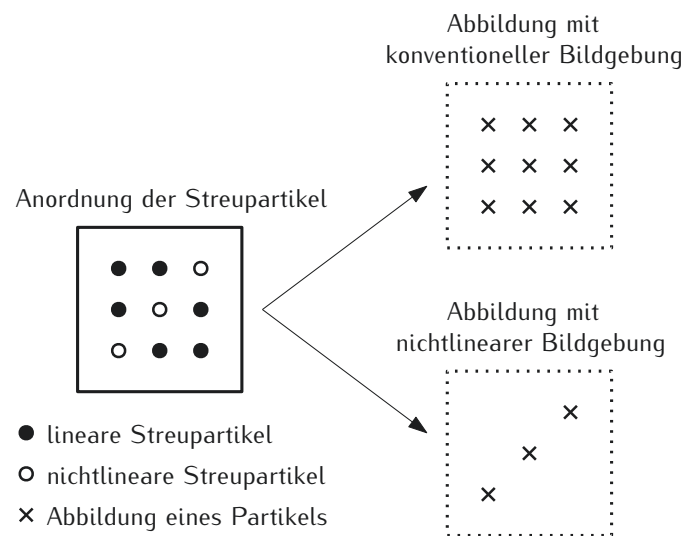


Abbildung 2.4: Schematische Gegenüberstellung einer Abbildung mit konventioneller Bildgebung und mit HI. Beim HI werden Partikel, welche eine lineare Streucharakteristik aufweisen ausgeblendet.

3 Experimentelle Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die experimentelle Strömungsuntersuchung in einer Zinksuspension dargelegt. Dazu wird in Abschnitt 3.1 die Zinksuspension genauer beschrieben und akustisch charakterisiert. Anschließend wird die genutzte Messtechnik bestehend aus Ansteuereinheit und Ultraschallwandlern vorgestellt (siehe Abschnitt 3.2).

3.1 Charakterisierung der Zinksuspension

3.1.1 Zusammensetzung der Zinksuspension

Die Zinksuspension besteht aus mikroskopischen Zinkpartikeln (Zn-Partikel) in einer wässrigen Kaliumhydroxidlösung (KOH-Lösung). Sie besitzt daher einen hohen pH-Wert von 14 und ist stark ätzend. Um das Absinken der Zinkpartikel zu vermeiden, wird außerdem das Geliermittel poly acrylic acid (dt.: Polyacrylsäure) (PAA) zugesetzt. Dieses ist ein hochmolekulares Polymer der Acrylsäure und führt zu nicht-Newtonschen rheologischen Eigenschaften. Zur Vermeidung von Selbstentladung und der Entstehung von Wasserstoff wird außerdem Zinkoxid zugesetzt.

Für die Leistungsfähigkeit der Zink-Luft-Flussbatterie (ZLFB) ist der Volumenanteil an Zinkpartikeln ein wesentlicher Parameter. Eine optimale Beladung hinsichtlich der erreichbaren Leistungsdichte der ZLFB konnte allerdings noch nicht gefunden werden. In dieser Arbeit wird daher zunächst eine Zusammensetzung der Suspension mit einem Volumenanteil von 8 vol.-% der Zinkpartikel ausgegangen. Für diesen Volumenanteil ist die Zusammensetzung der Zinksuspension in Tabelle 3.1 angegeben. Für die vorgestellten Experimente wurden Zinkpartikel (Grillo-Werke AG, Goslar, Deutschland) mit verschiedenen Partikelgrößenverteilungen eingesetzt. Diese sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Um die Strömung der Zinksuspension mittels Ultraschall zu messen, müssen die akustischen Eigenschaften Dämpfung, Schallgeschwindigkeit und spezifische Impedanz bekannt sein. Für deren Bestimmung können analytische Modelle genutzt werden [63, 64]. Allerdings gelten diese Modelle in der Regel nur für einen eingeschränkten Parameterbereich und gehen von sphärischen Partikeln aus. Die verwendeten Zinkpartikel

Tabelle 3.1: Zusammensetzung der Zinksuspension.

Stoff	Zn	KOH	ZnO	PAA	H ₂ O
Masseanteil ξ in wt.-%	33.8	19.9	4	0.7	41.7

Tabelle 3.2: Größenverteilung der Zinkpartikel. Angabe in vol.-%.

	< 25 μm	25 ... 45 μm	45 ... 63 μm	> 63 μm
Partikelklasse 1: Nutzung im Modellexperiment, Kapitel 4	0	20	68	12
Partikelklasse 2: Nutzung in der aktiven ZLFB, Kapitel 5	22	78	0	0

weichen stark von der sphärischen Form ab, wie der mikroskopischen Aufnahme in Abbildung 3.1 entnommen werden kann. Die akustische Charakterisierung erfolgt daher experimentell.

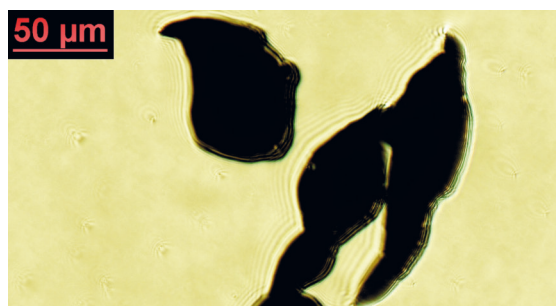


Abbildung 3.1: Mikroskopische Aufnahme der Zinkpartikel aus Partikelklasse 1.

3.1.2 Bestimmung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit

Die experimentelle Bestimmung der Dämpfung und der Schallgeschwindigkeit der Zinksuspension erfolgt über einen Transmissionsaufbau mit variabler Propagationslänge wie in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Zinksuspension wird in ein Gefäß aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gefüllt, an welchem von unten ein Ultraschallwandler angebracht ist (TX, transmit, dt.: Senden). In einem kleineren Gehäuse aus PMMA ist ein zweiter Ultraschallwandler (RX, receive, dt.: Empfang) untergebracht. Die Höhe des Ultraschallwandlers kann über einen Verfahrtschicht verändert werden. Dadurch ändert sich die Propagationslänge des Schalls im Fluid. Vom unteren Ultraschallwandler TX wird ein einzelner Puls ausgesendet und durch den oberen Wandler aufgezeichnet. Über den Verfahrtschicht wird die Entfernung z zwischen unterem und oberem Wandler in einem Bereich von $z_i = z_0 + i \cdot z_{\text{schritt}}$ mit $i = [1, N_{\text{pos}}]$ variiert. Für jede Position z_i wird ein Signal $r_i(t, z_i)$ aus der Mittlung von 250 wiederholten Signalausendungen gebildet. Während der Messung wurde die Zinksuspension kontinuierlich gerührt, um eine Mittlung über verschiedene Partikelanordnungen zu ermöglichen. In Tabelle 3.3 sind die Messparameter für die Bestimmung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit zusammengefasst.

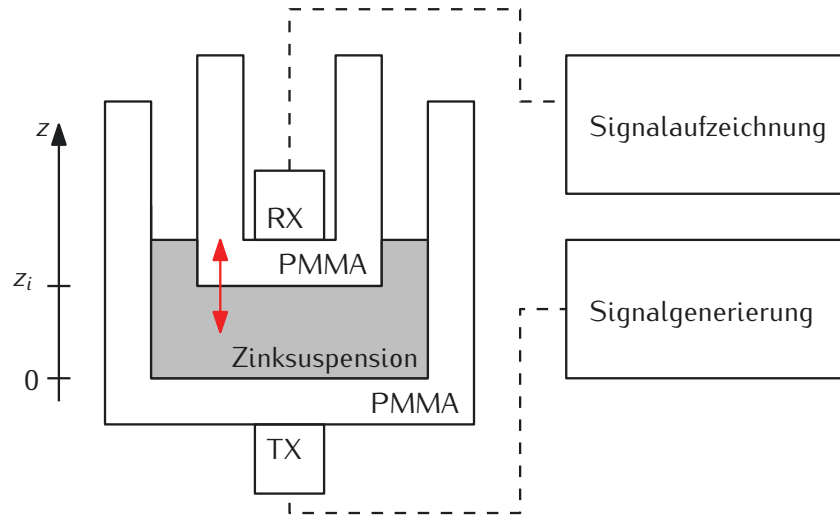


Abbildung 3.2: Messanordnung zur experimentellen Bestimmung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit der Zinksuspension. Durch den unteren Ultraschallwandler (TX, transmit, dt.: Senden) wird ein Ultraschallpuls ausgesandt, welcher durch die Suspension propagiert und durch den oberen Ultraschallwandler (RX, receive, dt.: Empfang) empfangen wird.

Bestimmung der Dämpfung

Die Dämpfung der Zinksuspension soll anhand des Dämpfungskoeffizienten α eines exponentiellen Abfalls nach:

$$p(z) = p_0 \exp(-\alpha z) \quad (3.1)$$

beschrieben werden. Dabei stellt $p(z)$ die Schalldruckamplitude der Schallwelle am Ort z entlang der Schallausbreitungsrichtung und p_0 die Schalldruckamplitude des Ausgangssignals dar. Zur Berechnung wird zunächst eine Fouriertransformation und Logarithmierung der empfangenen Signale durchgeführt:

$$R(f, z_i) = \mathcal{F}(r(t, z_i)), \quad (3.2)$$

$$R'(f, z_i) = 20 \cdot \log_{10}(|R(f, z_i)|). \quad (3.3)$$

Der Dämpfungskoeffizient α in dB m^{-1} kann dann mittels linearer Regression als Anstieg von $R'(f, z_i)$ für jede Frequenz f bestimmt werden.

In Abbildung 3.3a sind die gemessenen Dämpfungskoeffizienten α für verschiedene Volumenanteile v der Zinkpartikel dargestellt. Die Schalldämpfung steigt mit der Ultraschallfrequenz, als auch mit dem Volumenanteil der Zinkpartikel. Für einen Volumenanteil der Zinkpartikel von $v = 8 \text{ vol.-%}$ liegt die Dämpfung zwischen $\alpha(f = 3 \text{ MHz}) = 3,5 \text{ dB mm}^{-1}$ und $\alpha(f = 11 \text{ MHz}) = 10 \text{ dB mm}^{-1}$. Aus der Dämpfung kann die maximale Eindringtiefe des Ultraschalls abgeschätzt werden.

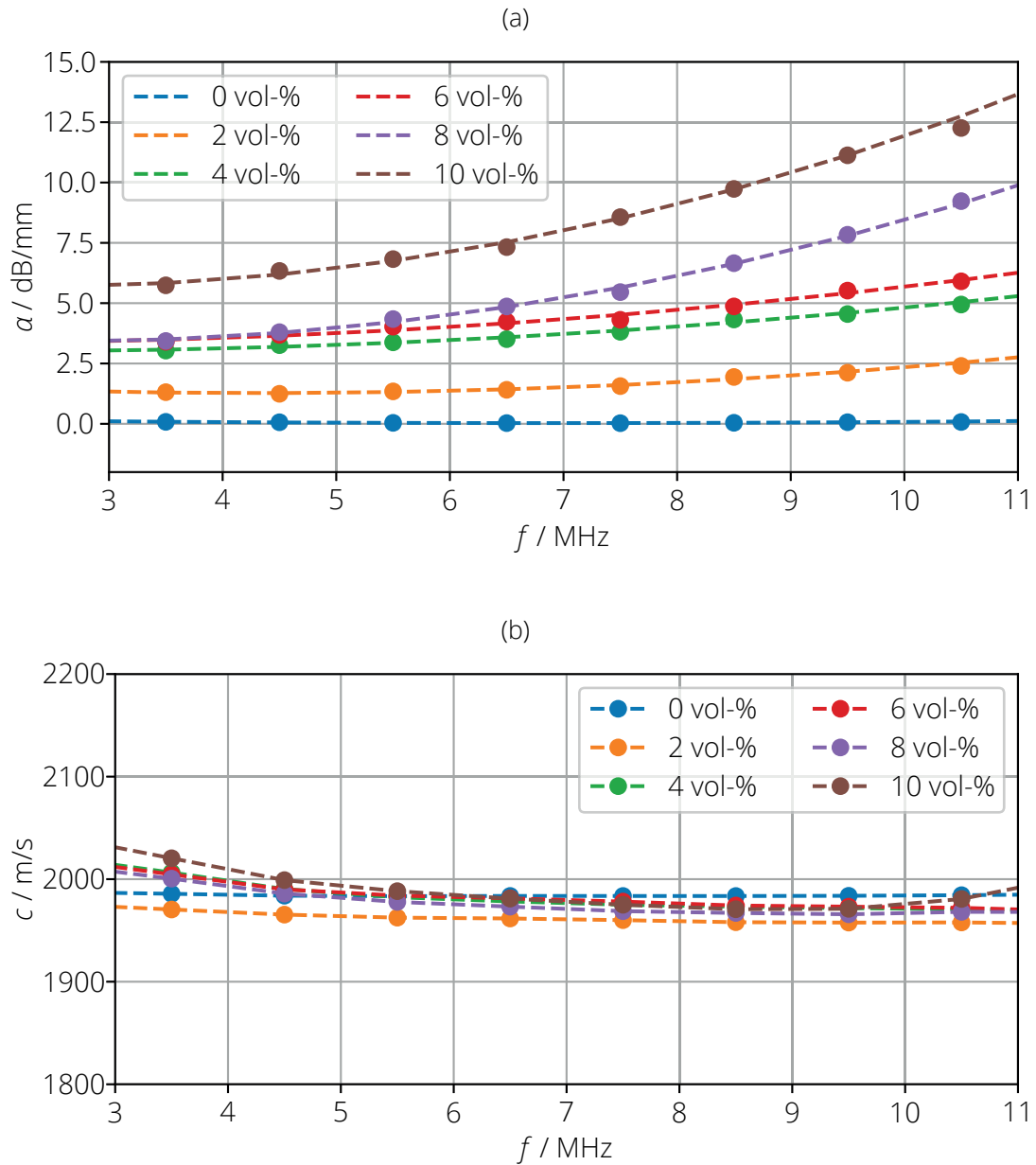


Abbildung 3.3: (a) Dämpfungskoeffizient α der Zinksuspension (Partikelklasse 1) für verschiedene Volumenanteile v der Zinkpartikel (farblich codierte Punkte). Die Abhängigkeit des Dämpfungskoeffizienten von der Ultraschallfrequenz f kann näherungsweise durch ein Polynom zweiten Grades beschrieben werden (gestrichelte Linie). (b) Schallgeschwindigkeit c der Zinksuspension (Partikelklasse 1) für verschiedene Beladungen mit Zinkpartikeln (farblich codierte Punkte). Zwecks besserer Übersichtlichkeit wurden die Messpunkte verbunden (gestrichelte Linie).

Tabelle 3.3: Übersicht der Messparameter für die Messung von Dämpfung und Schallgeschwindigkeit der Zinksuspension.

Messungen pro Position	250
Anzahl Positionen N_{pos}	16
Schrittgröße z_{schritt}	250 μm
Sendesignal	1 Periode, Mittenfrequenz $f = 10 \text{ MHz}$, Bandbreite 80 %
Ultraschallwandler	aktive Fläche: rund mit einem Durchmesser von 6 mm, Hersteller: Sonotec Ultraschallsensorik Halle GmbH, Halle, Deutschland

Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit $c(f)$ wird zunächst die Phase φ der empfangenen Signale berechnet:

$$\varphi(f, z_i) = \angle(\mathcal{F}(r(t, z_i))). \quad (3.4)$$

Anschließend wird die Phasendifferenz zwischen benachbarten Positionen z_i und z_{i+1} bestimmt:

$$\Delta\varphi(f, z_i) = \varphi(f, z_{i+1}) - \varphi(f, z_i) \text{ für } i = 0 \dots N_{\text{pos}} - 1. \quad (3.5)$$

Es wird nun der Mittelwert $\overline{\Delta\varphi}(f)$ berechnet. Die Schallgeschwindigkeit $c(f)$ kann dann bestimmt werden als:

$$c(f) = \frac{2\pi \cdot f \cdot z_{\text{schritt}}}{\overline{\Delta\varphi}(f)}. \quad (3.6)$$

In Abbildung sind die gemessenen Schallgeschwindigkeiten für verschiedene Volumenanteile der Zinkpartikeln dargestellt. Für einen Volumenanteil von $v = 8 \text{ vol.}\%$ sinkt die gemessene Schallgeschwindigkeit mit steigender Frequenz zunächst leicht ab. Für $f > 4,5 \text{ MHz}$ ist sie nahezu konstant bei $c = 1980 \text{ m s}^{-1}$.

3.1.3 Bestimmung der spezifischen akustischen Impedanz

Neben der Dämpfung und der Schallgeschwindigkeit ist die spezifische akustische Impedanz eine wesentliche akustische Eigenschaft eines Fluides. Mit Hilfe der akustischen Impedanz kann bestimmt werden, welcher Anteil der Schallenergie an einem Impedanzübergang reflektiert und welcher transmittiert wird. Für die Ultraschallströmungsmessung in einer aktiven ZLFB ist die Anpassung der akustischen Impedanz zwischen Fluid und dem Material des Strömungskanal aus folgenden Gründen sehr wichtig:

- Der überwiegende Anteil der Schallenergie wird in die Zinksuspension eingekoppelt, was zu einem guten Signal-Rausch-Verhältnis führt.

- Reflexionen am Impedanzübergang von Strömungskanal zur Zinksuspension werden vermieden. Dadurch sind auch wandnahe Messungen möglich.

Der experimentelle Aufbau zur Messung der spezifischen akustischen Impedanz ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Durch einen Ultraschallwandler an der Unterseite eines PMMA-Behälters wird ein Ultraschallpuls ausgesendet. Dieser wird am Übergang von PMMA zum Fluid reflektiert und durch den Ultraschallwandler wieder aufgezeichnet. Aus 250 wiederholten Aussendungen wird das Signal $r_{\text{reflektiert}}$ gemittelt. Dabei wird die Zinksuspension kontinuierlich gerührt.

Die Messung wird für die Zinksuspension mit einem Volumenanteil von 8 vol.-% Zink und für Wasser durchgeführt. Aus den jeweiligen Amplitudenspektren der reflektierten Signale $R_{\text{Zn}}(f)$ und $R_{\text{H}_2\text{O}}(f)$ kann die akustische Impedanz der Zinksuspension $Z_{0,\text{Zn}}$ wie folgt bestimmt werden:

$$Z_{0,\text{Zn}} = \frac{Z_{0,\text{PMMA}}(aZ_{0,\text{H}_2\text{O}} - aZ_{0,\text{PMMA}} + Z_{0,\text{PMMA}} + Z_{0,\text{H}_2\text{O}})}{aZ_{0,\text{PMMA}} - aZ_{0,\text{H}_2\text{O}} + Z_{0,\text{PMMA}} + Z_{0,\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.7)$$

mit

$$a = \frac{R_{\text{Zn}}(f)}{R_{\text{H}_2\text{O}}(f)}. \quad (3.8)$$

Dabei stellen $Z_{0,\text{PMMA}}$ und $Z_{0,\text{H}_2\text{O}}$ die akustischen Impedanzen von PMMA und Wasser dar. Über den gesamten untersuchten Frequenzbereich von 3...10 MHz ergibt sich für die Zinksuspension (Partikelklasse 1) eine näherungsweise konstante akustische Impedanz von $Z_{0,\text{Zn}} \approx 2,5 \text{ Ns/m}^3$.

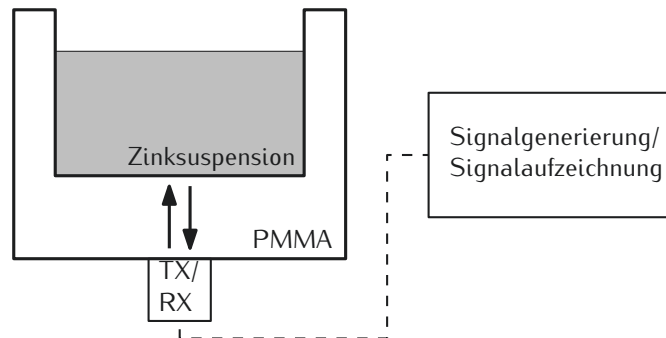


Abbildung 3.4: Experimenteller Aufbau zur Messung der akustischen Impedanz der Zinksuspension.

3.2 Messtechnik

3.2.1 Ultraschallforschungsplattform: Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter

Für die Durchführung der in dieser Arbeit vorgestellten Experimente, wurde das Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter (PAUDV) genutzt. Das PAUDV ist eine modu-

lare generische Ultraschallforschungsplattform, welche an der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik entwickelt wurde [39]. Die Systemarchitektur ist in Abbildung 3.5 dargestellt und lässt sich in folgende wesentliche Bestandteile untergliedern:

- **PAUDV-Elektronik:** Steuerung der zeitkritischen Abfolge von Signalausendung, -aufnahme und -konditionierung,
- **Kontroll- und Aufnahmecomputer:** Digitalisierung und Vorverarbeitung der Ultraschallsignale, abstrakte Beschreibung des Messaufbaus und -ablaufs sowie Signalverarbeitung.

In Tabelle 3.4 sind die wesentlichen Spezifikationen des PAUDV gelistet. Für eine detaillierte Beschreibung und Charakterisierung des Systems sei auf [65] verwiesen.

Im Hinblick auf die Messung in der vorliegenden Arbeit werden folgende Anforderungen an die Ansteuerung der Ultraschallwandler gestellt:

- **Abbildung komplexer Messmodi:** Im Rahmen dieser Arbeit sollen verschiedene Messmodi angewendet werden. Dazu zählen einerseits verschiedene Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung (z.B. Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV) oder Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie) (UIV)). Je nach Verfahren unterscheiden sich die optimalen Parameter wie Anregungsfrequenz, Pulslänge und Wiederholrate und müssen entsprechend parametrisiert werden. Für die Messung an der aktiven ZLFB sollen außerdem weitere Messmodi wie das Pulsinversionsverfahren (PI) (siehe Abschnitt 5.2) eingesetzt werden. Diese erfordern, dass in einem sehr kurzen zeitlichen Abstand zwei zueinander invertierte Ultraschallpulse ausgesendet werden. Dieser Vorgang soll dann mehrfach wiederholt werden. Es handelt sich also um eine Verschachtelung von unterschiedlichen Messungen (invertierter und nicht invertierter Puls). Das PAUDV ist in der Lage diese Messmodi abzubilden, da die Beschreibung der Experimente sowie der Messung mit allen Parametern zunächst in der Hochsprache Python erfolgt. Zur Durchführung der Messung wird dann ein Befehlssatz erstellt, welcher an die Steuereinheit der PAUDV-Elektronik übertragen wird. Diese interpretiert die Befehle und konfiguriert die Elektronik entsprechend des beschriebenen Messablaufes. So wird eine große Flexibilität bezüglich des Messablaufes und der Messparameter ermöglicht, was die Durchführung der in dieser Arbeit verwendeten Messmethoden zulässt.
- **Hohe Pulswiederholraten:** Für die Durchführung der Strömungsmessung sowie für die Anwendung des PI sind hohe Messraten im Bereich einiger Kilohertz notwendig. Die maximale Pulswiederholrate von 20 kHz des PAUDV ermöglicht diese Messungen.
- **Anschluss mehrerer Ultraschallwandler und individuelle Konfiguration der einzelnen Ultraschallkanäle:** Für die Anwendung des Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung) (HI) zur Strömungsmessung (siehe Kapitel 5) ist es vorgesehen, ein Ultraschall-Phased-Array zu nutzen, welches aus zwei Arrays mit unterschiedlichen Eigenschaften besteht. Die beiden Arrays sind jeweils mit einem

Tabelle 3.4: Spezifikationen für das PAUDV.

Sendepfad	
ansteuerbare Kanäle	256
maximale Anregungsspannung	200 V
Sendemuster	64 Samples, dreistufige Quantisierung, maximale Samplingfrequenz $f_s = 80 \text{ MHz}$
maximale Pulswiederholrate	$f_{PR, \max} = 20 \text{ kHz}$
Empfangspfad	
spezifizierter Frequenzbereich	$1 \text{ MHz} < f < 18 \text{ MHz}$
konfigurierbare, statische Verstärkung	17 ... 67 dB
zeitabhängige Verstärkung	-5 ... 31 dB
Analog-Digital-Umsetzer	12 bit, $32 \text{ MHz} < f_s < 50 \text{ MHz}$

Hypertronics-Stecker verbunden, welche an die PAUDV-Elektronik angeschlossen werden müssen. Aufgrund der generischen Bauweise der PAUDV-Elektronik ist es möglich, eine neue Backplane zum Anschluss zweier Arrays aufzubauen und somit den Anschluss der beiden Arrays zu ermöglichen. Darüber hinaus sind keine Änderungen an der Elektronik notwendig.

- **Zugang zu den rohen Messdaten:** Um eine optimale Signalverarbeitung für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung durchführen zu können, ist ein Zugang zu den rohen Ultraschallsignalen notwendig. Beispielsweise muss der Intensitätsabfall aufgrund der starken akustischen Dämpfung in der Zinksuspension im Rohsignal kompensiert werden. Das PAUDV erlaubt den Zugang zur Gesamtheit der aufgezeichneten Ultraschallsignale.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass das PAUDV als generische Forschungsplattform geeignet ist, um die avisierten Messverfahren und -methoden anzuwenden.

3.2.2 Ultraschallwandler

Für die in dieser Arbeit beschriebenen Experimente wurden zwei Ultraschall-Phased-Arrays genutzt. Es handelt sich dabei um lineare Phased Arrays bei denen die einzelnen Ultraschallelemente nebeneinander angeordnet sind, wie in Abbildung 2.1 dargestellt.

Imasonic-Array

Für die Untersuchung der Strömung im Modellexperiment (siehe Kapitel 4) wird ein lineares Phased Array genutzt, welches von der Firma Imasonic SAS Voray-sur-l'Ognon,

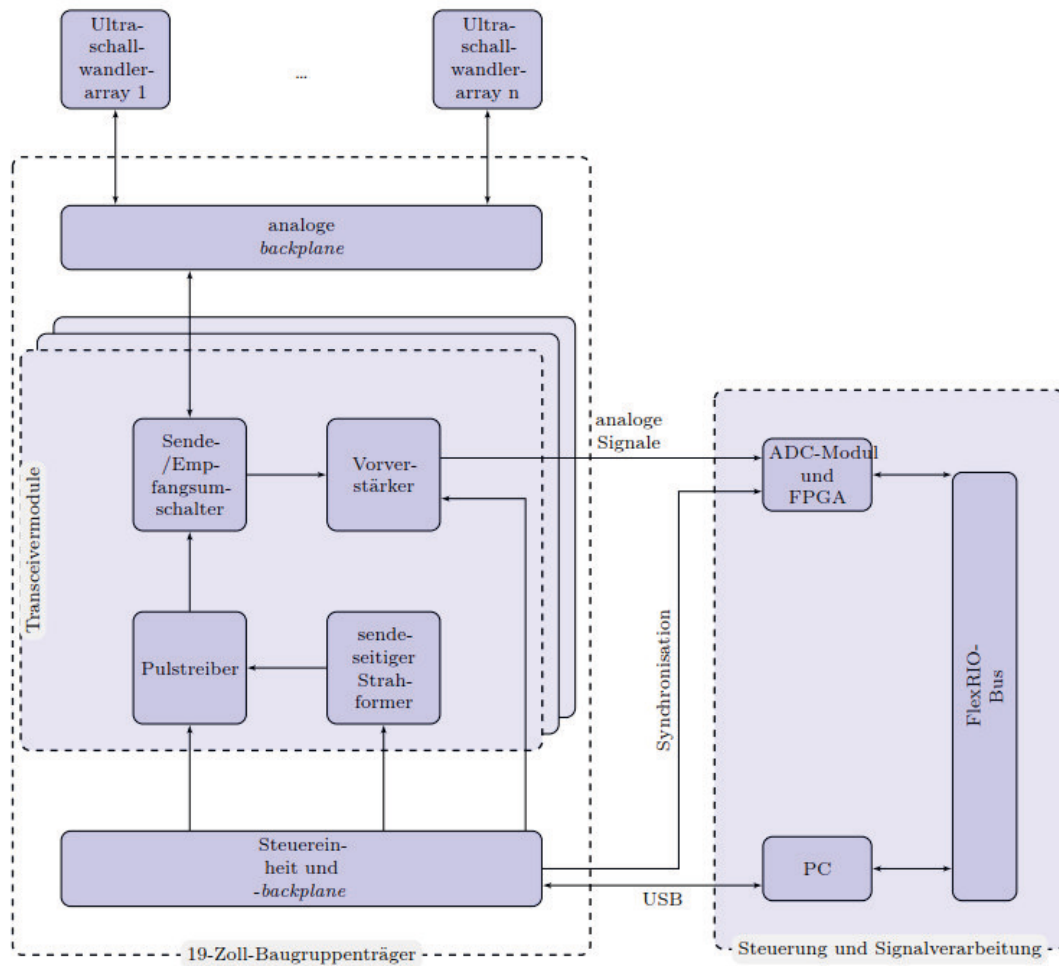


Abbildung 3.5: Systemarchitektur des PAUDV. Mit Genehmigung entnommen aus [65].

Tabelle 3.5: Spezifikationen des Imasonic-Arrays

Anzahl der Ultraschallelemente	128
Abstand der Ultraschallelemente d_{pitch}	0,3 mm
Höhe der Ultraschallelemente $d_{\text{elevation}}$	3 mm
Mittenfrequenz	4 MHz
Relative Bandbreite	70 %
Impedanzanpassung	$3,2 \text{ N s m}^{-3}$

Frankreich gefertigt wurde. Die Spezifikationen des Arrays sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Vernon-Zweifrequenz-Array

Für die Untersuchung der Strömung in der aktiven ZLFB (siehe Kapitel 5) wird ein lineares Phased Array genutzt, welches von der Firma Vernon, Tours, Frankreich gefertigt wurde. Es handelt sich dabei um ein Zweifrequenz-Array, ähnlich dem wie es in [66, 67] verwendet wurde. Dabei sind zwei lineare Phased Arrays hintereinander angebracht. Der Aufbau ist in einer Schnittdarstellung in Abbildung 3.6 verdeutlicht. Das vordere Array wird im folgenden als Hochfrequenz-Array (engl.: High frequency array, kurz HF-Array) bezeichnet, das hintere als Niederfrequenz-Array (engl.: Low frequency array, kurz LF-Array). Die beiden Arrays sind aus dem gleichen Piezo-Composite Material gefertigt, unterscheiden sich aber in ihren Eigenschaften bezüglich Dicke und Elementgröße und damit in ihrer Mittenfrequenz und Bandbreite. Die Spezifikationen sind jeweils in Tabelle 3.6 gelistet. HF- und LF-Array können jeweils sowohl zum Senden als auch zum Empfangen von Ultraschall verwendet werden. Für die Anwendung der nichtlinearen Bildgebung wird das hintere LF-Array zur Anregung des Ultraschalls genutzt. Das vordere HF-Array wird für den Empfang der Ultraschallechos verwendet.

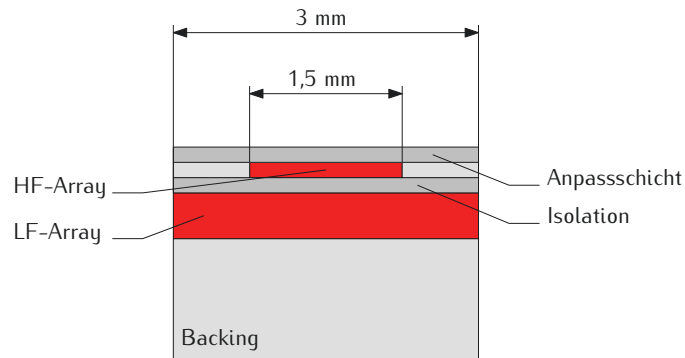


Abbildung 3.6: Schnitt (in der y-z-Ebene in Abbildung 2.1) durch das Zweifrequenz-Array. Hochfrequenz- (engl. High frequency, kurz HF) und Niederfrequenz-Array (engl. Low frequency, kurz LF) liegen aufeinander und werden durch eine Isolationsschicht elektrisch getrennt.

Tabelle 3.6: Spezifikationen des Vernon-Zweifrequenz-Arrays

Hochfrequenz-Array (HF)	
Anzahl der Ultraschallelemente	128
Abstand der Ultraschallelemente d_{pitch}	0,1 mm
Höhe der Ultraschallelemente $d_{\text{elevation}}$	1,5 mm
Mittenfrequenz	15,5 MHz
Relative Bandbreite	51 %
Niederfrequenz-Array (LF)	
Anzahl der Ultraschallelemente	42
Abstand der Ultraschallelemente d_{pitch}	0,3 mm
Höhe der Ultraschallelemente $d_{\text{elevation}}$	3 mm
Mittenfrequenz	5 MHz
Relative Bandbreite	77 %
Impedanzanpassung	$3,2 \text{ N s m}^{-3}$

4 Verfahren zur Strömungsmessung im Modellexperiment

In diesem Kapitel wird die Optimierung, Charakterisierung und Anwendung eines Messverfahrens zur 2D2C-Strömungsmessung in Suspensionen präsentiert. Ziel ist es, die Strömungsumlenkung und -aufweitung in einem Modellexperiment zu erfassen.

In Abschnitt 4.1 wird zunächst der experimentelle Aufbau dargelegt und die Anforderungen an das Messverfahren abgeleitet. In Abschnitt 4.2 soll dann zunächst untersucht werden, welches der in Abschnitt 2.3 vorgestellten Verfahren für eine Messung der Zinksuspensionsströmung geeignet ist. Das Verfahren wird in Abschnitt 4.3 bezüglich der Messsystemparameter optimiert und die Messeigenschaften charakterisiert. Anhand der Strömungsmessung am Modellexperiment wird in Abschnitt 4.4 die Eignung des Messverfahrens zur Untersuchung von Suspensionsströmungen demonstriert.

4.1 Experimenteller Aufbau

Im Modellexperiment soll ein L-förmiger Strömungskanal untersucht werden, siehe Abbildung 4.1. Im Bereich der Zuströmung beträgt die Kanalhöhe 2 mm und geht nach der Strömungsumlenkung im Hauptkanal in eine Höhe von 15 mm über. Die Messregion im Hauptkanal liegt in der x-y-Ebene mittig in z-Richtung und hat eine Größe von $20 \times 15 \text{ mm}^2$. Der Kanal besitzt eine Breite von 47 mm und folglich ein Aspektverhältnis von ungefähr drei zwischen Breite und Höhe. Damit konnte ein Kompromiss zwischen möglichst geringer Strömungsvariation in z-Richtung im Messbereich und einem vertretbaren Volumen des Strömungskanals gefunden werden. Die Wände wurden aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gefertigt mit einer Dicke von 4 mm.

In der Messregion kann eine Strömungsumlenkung und -aufweitung beobachtet werden. Dabei geht das Strömungsfeld von den asymmetrischen Bedingungen am Einlass zu einer symmetrischen Form weiter im Hauptkanal über. Die zum Ultraschallwandler axiale Strömungskomponente kann in der Regel mit geringerer Messunsicherheit erfasst werden als die laterale Komponente [68]. Da die Hauptströmungskomponente in x-Richtung zeigt, wurde der Ultraschallwandler für die Messung an der linken Wand des Kanals angebracht. In Tabelle 4.1 sind die aus dem experimentellen Aufbau abgeleiteten Anforderungen an das Messsystem zusammengefasst. Für eine Abschätzung der erforderlichen Ortsauflösung wurde eine vereinfachte Simulation der Flüssigphase der Zinksuspension ohne Partikel (Elektrolyt) im Modellexperiment durchgeführt. Für

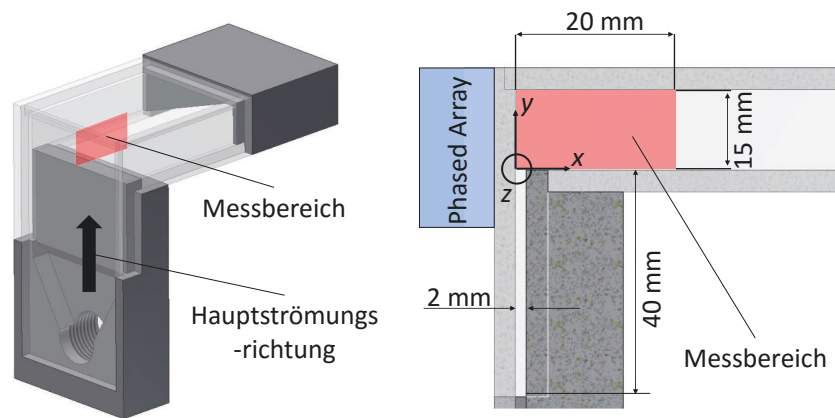


Abbildung 4.1: Links: dreidimensionale Ansicht des Strömungskanals für das Modell-experiment. Der Messbereich befindet sich in z-Richtung mittig. Rechts: Schnitt durch die Messebene.

das Strömungsprofil der Geschwindigkeit v_x bei $x = 5 \text{ mm}$ beträgt die Abweichung 10 % zwischen dem originalen und dem Profil mit einer reduzierten Auflösung von 1,75 mm.

4.2 Untersuchung geeigneter Verfahren zur Messung von Strömungsfeldern in der Zinksuspension

In diesem Abschnitt werden die Geschwindigkeitsmessverfahren Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV) und Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie) (UIV) hinsichtlich ihrer Eignung zur Strömungsmessung in der Zinksuspension untersucht. Dies geschieht anhand der numerischen Simulation der Schallausbreitung in der Zinksuspension.

In einem Abstand von 10 mm werden eine Punktquelle und ein Punktempfänger positioniert, siehe Abbildung 4.2. Durch die Punktquelle wird in einem Simulationsdurchlauf ein Ultraschallpuls ausgesendet, welcher durch die Zinksuspension propagiert und durch den Punktempfänger aufgezeichnet wird. Die Parameter und Spezifikationen für die Simulation sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Um zunächst den Einfluss der Partikel auf die Schallausbreitung zu verdeutlichen, wird die Ultraschallwelle für einen Volumenanteil der Zinkpartikel von $\nu = 0 \text{ vol.-%}$ (Zinksuspension ohne Partikel) und für $\nu = 8 \text{ vol.-%}$ betrachtet. Die momentane Schalldruckpegelverteilung zum Zeitpunkt $t = 3 \mu\text{s}$ nach der Aussendung des Ultraschallpulses ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Für das homogene Fluid bildet sich eine Kugelwelle mit hoher örtlicher Kohärenz aus, und es ist eine klar definierte Wellenfront zu erkennen. Für die Zinksuspension mit einem Volumenanteil von $\nu = 8 \text{ vol.-%}$ Zinkpartikeln ist die Wellenfront aufgrund der Streuung an den Partikeln gestört, und die örtliche Kohärenz der

Tabelle 4.1: Anforderungen an das Messsystem für das Modellexperiment.

Eigenschaft Messobjekt	Anforderung an das Messsystem
2D/3D-Strömungsstruktur aufgrund komplexer rheologischer Eigenschaften des Fluids	zweidimensionale, zweikomponentige (2D2C) Vermessung der Strömung im Fluidvolumen
Hohe Gradienten im Strömungsfeld aufgrund der nicht-Newtonschen Eigenschaften des Fluids	Ortsauflösung $d_{\text{soll}} \leq 1,75 \text{ mm}$
Messregion $20 \times 15 \text{ mm}^2$ und Volumenanteil von $\approx 8 \text{ vol.-%}$ Zinkpartikeln	Eindringtiefe $\geq 20 \text{ mm}$
Stark ätzendes Fluid	nicht invasive Messung

Tabelle 4.2: Parameter und Spezifikationen für die numerische Simulation der Schallausbreitung in der Zinksuspension

Anregungssignal	3 MHz, 1 Periode
Simulationsmethode	Elastodynamische Finite Integrationstechnik [69]
Zinkpartikeldurchmesser	$40 \mu\text{m}$
Schallgeschwindigkeit Zink	4210 m s^{-1}
Dichte Zink	$7,14 \text{ g cm}^{-3}$
Schallgeschwindigkeit KOH-Lösung	2285 m s^{-1}
Dichte KOH-Lösung (50 wt.-% KOH)	$1,5 \text{ g cm}^{-3}$
Pulswiederholrate	100 Hz
Aussendungen pro Volumenanteil ν	1000

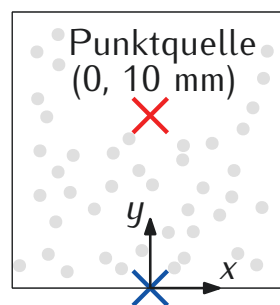


Abbildung 4.2: Simulationsanordnung: Ein Ultraschallpuls wird von einer Punktquelle (rotes Kreuz) zu einem Punktempfänger (blaues Kreuz) durch die Zinksuspension propagiert.

Tabelle 4.3: Physikalische Eigenschaften der kontinuierlichen und suspendierten Phase der Zinksuspension. Die mit * gekennzeichneten Angaben sind für die KOH-Lösung (kontinuierliche Phase) nicht bekannt. Als Näherung wurden daher die Angaben für Wasser genutzt. Die Angaben zur Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität wurden [70] entnommen.

Eigenschaft	suspendierte Phase	kontinuierliche Phase	Kontrast
Dichte	7,14 g cm ⁻³	1,22 g cm ⁻³	5,85
Schallgeschwindigkeit	4170 m s ⁻¹	1975 m s ⁻¹	2,11
Kompressionsmodul	70 GPa	2,08 GPa	33,65
Wärmeleitfähigkeit	117 W m ⁻¹ K ⁻¹ (für 0 °C)	0,56 W m ⁻¹ K ⁻¹ * (für 0 °C)	183
Wärmekapazität	0,385 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹ (für 0 °C)	4,18 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹ * (für 20 °C)	10,88

Welle ist vermindert. Ursache ist der hohe Kontrast in den physikalischen Eigenschaften Dichte, Schallgeschwindigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der suspendierten und kontinuierlichen Phase, siehe Tabelle 4.3. Um den Einfluss der Zinkpartikel auf die Amplitude und Phase der empfangenen Signale zu betrachten, wird die Simulation für 50 verschiedene zufällige Partikelverteilungen wiederholt. Die empfangenen Signale sowie deren Mittelwert sind in Abbildung 4.4a dargestellt. Ändert sich die Partikelanordnung, so ändert sich die Phase und Amplitude des empfangenen Signals. Eine solche Änderung der Partikelanordnung tritt bei der Strömungsmessung aufgrund der Gradienten im Strömungsfeld permanent auf. Die Schwankung der Phase und Amplitude verursacht eine erhöhte Messunsicherheit bei der Geschwindigkeitsschätzung im Vergleich zur Zinksuspension ohne Partikel.

Zum Vergleich der Geschwindigkeitsmessverfahren UDV und UIV wird wie folgt vorgegangen. Die Simulation wird für Volumenanteile ν von 0 vol.-% bis 10 vol.-% mit einer Schrittgröße von 0,5 vol.-% jeweils 1000 mal wiederholt. Bei jeder Wiederholung wird die Anordnung der Zinkpartikel zufällig variiert. Aus den empfangenen Ultraschallsignalen kann die Relativgeschwindigkeit zwischen Punktquelle und -empfänger bestimmt werden. Es wird dazu folgende Signalauswertung genutzt:

- **UDV:** Von den empfangenen Signalen wird jeweils ein Abschnitt (engl.: gate) der Größe von zwei Wellenlängen extrahiert, welcher den empfangenen Puls enthält. Die Position des gates wird durch die mittlere Ankunftszeit der Signale aller Wiederholungen bei dem jeweiligen Volumenanteil gebildet. Alle Kombinationen zweier Signale werden für die dopplerbasierte Geschwindigkeitsschätzung nach Loupas et al. [52] genutzt.

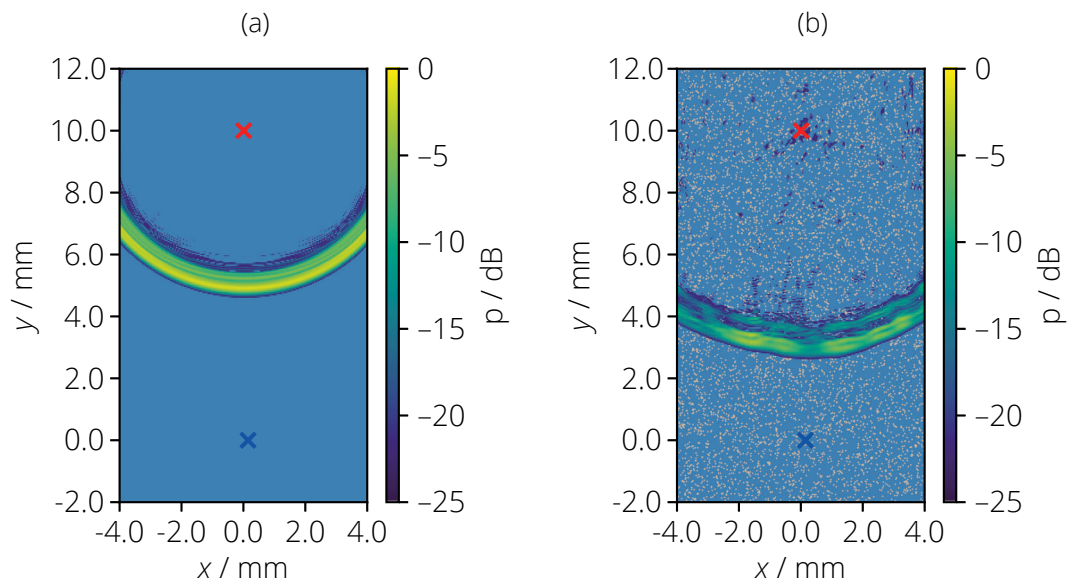


Abbildung 4.3: Verteilung des Schalldruckpegels für $t = 3 \mu\text{s}$ nach der Aussendung des Ultraschallpulses. (a) Volumenanteil $v = 0 \text{ vol.-%}$ (Zinksuspension ohne Partikel), (b) Volumenanteil $v = 8 \text{ vol.-%}$. Die Position der Punktquelle ist durch das rote Kreuz gekennzeichnet. Die Position des Punktempfängers ist durch das blaue Kreuz gekennzeichnet. Im Hintergrund sind die jeweiligen Materialien KOH-Lösung (blau) und Zn-Partikel (braun) gekennzeichnet. Der angegebene Schalldruck wurde auf den maximalen Schalldruck normiert.

- **UIV:** Die empfangenen Signale werden in gates der Größe einer Wellenlänge unterteilt. Dabei werden acht dieser gates pro Wellenlänge gebildet, so dass sich diese überschneiden. Für jedes gate wird der Effektivwert des Signals gebildet. Um eine Vergleichbarkeit zur UDV herzustellen, werden 16 aufeinanderfolgende Effektivwerte genutzt, um eine Korrelation zwischen zwei Signalen mit verschiedenen Partikelanordnungen durchzuführen. Dadurch wird die gleiche örtliche Auflösung von zwei Wellenlängen wie bei der UDV erreicht. Aus der Position des Maximums und der willkürlich festgelegten Pulswiederholrate f_{prf} kann anschließend eine Geschwindigkeit geschätzt werden. Wie bei der UDV werden alle Kombinationen zweier empfangener Signale für die Geschwindigkeitsschätzung genutzt.

Der wahre Wert der Relativgeschwindigkeit von Sender und Empfänger in Schallausbreitungsrichtung ist $v = v_y = 0$, da sich der Abstand zwischen ihnen nicht verändert. Die systematischen Messabweichungen des Mittelwertes der gemessenen Geschwindigkeiten $F_{v,\text{sys}} = \frac{\Delta v}{v_{\text{max}}}$ für $v = 8 \text{ vol.-%}$ sind 0,07 % für die UDV und 0,06 % für die UIV. Die beiden Geschwindigkeitsschätzer werden daher als näherungsweise erwartungstreu betrachtet. Nun wird die relative zufällige Messabweichung $F_{v,\text{zuf}} = \frac{s_v}{v_{\text{max}}}$ bestimmt. Dabei stellt s_v die empirische Standardabweichung aller Geschwindigkeitsschätzungen bei einem festen Volumenanteil v und v_{max} die mit der UDV maximal bestimmbare Geschwindigkeit dar. In Abbildung 4.4b ist die relative zufällige Messabweichung für die beiden Verfahren in Abhängigkeit des Volumenanteils v dargestellt. Für einen Volumenanteil $v = 0 \text{ vol.-%}$ (Zinksuspension ohne Partikel) beträgt die zufällige Abweichung $F_{v,\text{zuf}} = 0$. Dies entspricht den Erwartungen, da hier keine Variation des empfangenen Signals mit der Partikelanordnung statt findet und keine weiteren Unsicherheiten betrachtet werden. Für Volumenanteile zwischen 0 vol.-% und 1 vol.-% steigt die Messabweichung für beide Verfahren auf das Maximum an und sinkt darüber leicht ab. Dies kann wie folgt begründet werden. Je höher die Volumenbeladung mit Zinkpartikeln ist, desto geringer ist die Variation bei zufälliger Neupositionierung der Partikel. Die zufällige Messabweichung der UIV ist für jede Volumenbeladung geringer als die der UDV. Es wird daher davon ausgegangen, dass die UDV wesentlich empfindlicher gegenüber den eingebrachten Störungen ist. Grund dafür ist, dass eine besonders starke Störung der Phase auftritt, welche bei der UDV zur Geschwindigkeitsmessung genutzt wird. Die UIV wertet dagegen die ortsverteilte Intensität aus und ist somit robuster gegenüber den Phasenstörungen.

In diesem Abschnitt konnte anhand einer Simulation gezeigt werden, dass die UIV für die Geschwindigkeitsmessung in der Zinksuspension geeignet ist. Im Vergleich zur UDV ist die UIV wesentlich robuster gegenüber Störungen die durch die Zinkpartikel eingebracht werden. Um die UIV zur Messung des Strömungsfeldes im Modell der Zink-Luft-Flussbatterie (ZLFB) anwenden zu können, müssen die Messsystemparameter auf die Zinksuspension angepasst werden.

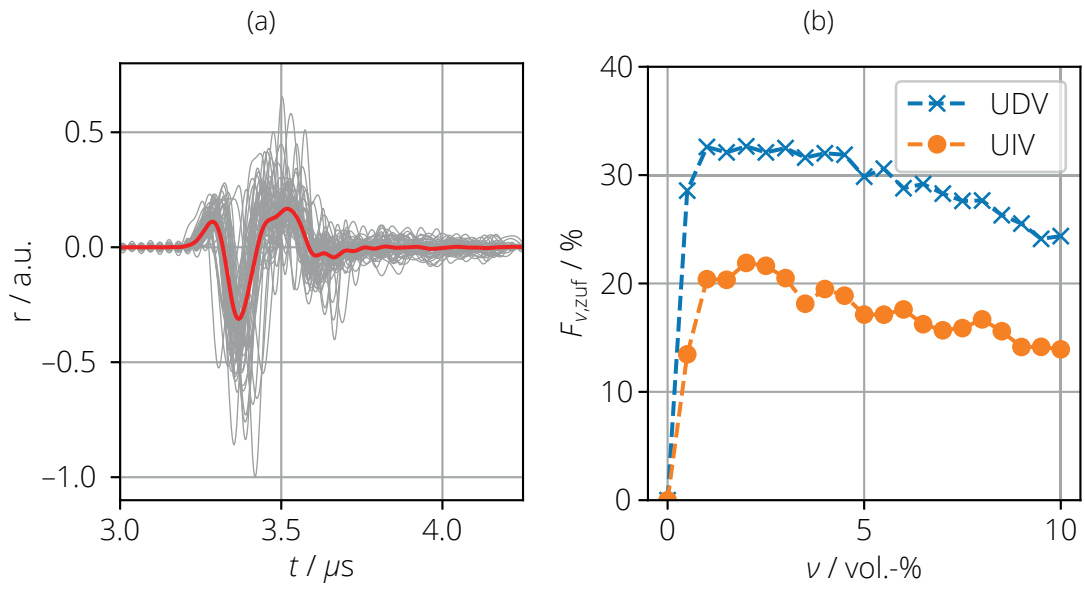


Abbildung 4.4: (a) Überlagerung von empfangenen Signalen für 50 verschiedene Partikelanordnungen (grau), sowie deren Mittelwert (rot). (b) Relative zufällige Standardabweichung $F_{v,zuf}$ in Abhängigkeit des Volumenanteils v der Zinkpartikel für die Geschwindigkeitsschätzung mittels UDV und UIV.

4.3 Optimierung der Signalverarbeitung und Charakterisierung der Messeigenschaften

In diesem Abschnitt wird die Anpassung der UIV an die messtechnischen Randbedingungen bei der Messung in der Zinksuspension vorgestellt. Mittels Messung am Geschwindigkeitsnormal wird das Messverfahren optimiert und hinsichtlich der Messunsicherheit und Ortsauflösung charakterisiert. Abschließend erfolgt eine Validierung des Messverfahrens durch eine Messung im Modellexperiment. Dazu wird ein Fluid verwendet, dessen Strömungsfeld durch einfache validierte numerische Simulationen abgebildet werden kann.

4.3.1 Geschwindigkeitsnormal

Im Bereich der Ultraschallströmungsmesstechnik ist es üblich, die Wasserströmung in einem Kanal mit rundem Querschnitt als Strömungsnormale zu verwenden. Unter der Annahme einer laminaren Strömung, kann das Strömungsfeld in diesem Fall analytisch aus den Navier-Stokes-Gleichungen abgeleitet werden. Für die Zinksuspension ist das nicht möglich, da die rheologischen Eigenschaften komplex und teils unbekannt sind. Alternativ werden Ergebnisse numerischer Simulationen als Referenz verwendet. Aufgrund der unbekannten rheologischen Eigenschaften ist auch dieses Vorgehen nicht möglich.

In dieser Arbeit wurde daher ein Geschwindigkeitsnormal erzeugt, indem der Ultraschallwandler relativ zur ruhenden Suspension bewegt wird, siehe Abbildung 4.5. Aufgrund der hohen Viskosität der Zinksuspension tritt über mehrere Stunden keine Sedimentation der Partikel auf und die Partikel können somit über die Messdauer von einigen Sekunden als statisch betrachtet werden. Der Ultraschallwandler befindet sich zum Schutz vor dem ätzenden Kaliumhydroxid in einem PMMA-Gehäuse. Für die beiden Strömungskomponenten (axial zum Ultraschallwandler: entspricht der x-Komponente im Modellexperiment, lateral zum Ultraschallwandler: entspricht der y-Komponente im Modellexperiment) in der Messebene wird je ein Geschwindigkeitsnormal genutzt:

- **Axiales Geschwindigkeitsnormal:** Auf die Suspension wird eine dickere Schicht Wasser aufgebracht. Aufgrund der unterschiedlichen Dichten und Viskositäten kommt es nicht zu einer Durchmischung von Zinksuspension und Wasser. Das Gehäuse mit dem Ultraschallwandler wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v_{\text{norm,axial}} = 2 \text{ mm s}^{-1}$ durch das Wasser in Richtung der Suspension verfahren. Für jede Messwiederholung wird der Ultraschallwandler an eine andere y-Position bewegt.
- **Laterales Geschwindigkeitsnormal:** Das Gehäuse mit dem Ultraschallwandler wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v_{\text{norm,lateral}} = 5 \text{ mm s}^{-1}$ entlang der Oberfläche der Zinksuspension verfahren. Damit die hochviskose Zinksuspension nicht mit dem Gehäuse mitgezogen wird, wird eine Ankoppelschicht aus

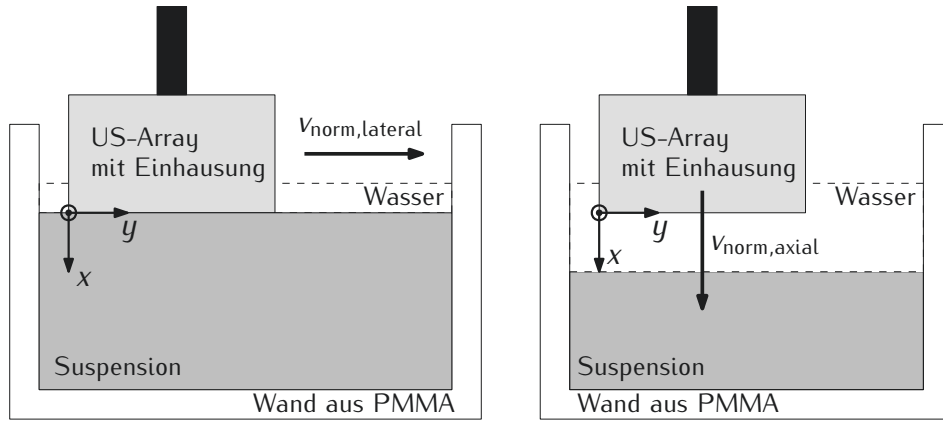


Abbildung 4.5: Geschwindigkeitsnormal für laterale (links) und axiale (rechts) Strömungskomponente.

Wasser aufgebracht. Dadurch wird das Gehäuse nur im Wasser bewegt und beeinflusst die Position der Partikel nicht.

Der Ultraschallwandler mit Gehäuse wird mittels linearem Verfahrtsch bewegt. Die dabei auftretende maximale relative Messabweichung beträgt $F_{v,ref} = 0,025\%$ und ist somit im Vergleich zu den bei der Ultraschallmessung auftretenden Abweichungen vernachlässigbar.

4.3.2 Optimierung der Messsystemparameter

Ziel der Optimierung der Messsystemparameter ist die Anpassung des Messsystems an die Zinksuspension. Dazu werden mehrere Messungen am Kalibrierstand mit verschiedenen Parametersätzen durchgeführt. Anhand der Minimierung einer Zielfunktion Γ kann dann das Messsystem optimiert werden. Die Zielfunktion Γ wird dabei so gewählt, dass sie einerseits eine geringe systematische Messabweichung und andererseits eine hohe Ortsauflösung abbildet:

$$\Gamma = F_{\tilde{v}_x,sys} + F_{\tilde{v}_y,sys} + d' \quad (4.1)$$

Dabei stellen $F_{\tilde{v}_x,sys}$ und $F_{\tilde{v}_y,sys}$ die mittlere, relative systematische Messabweichung der x - und y -Komponente des Strömungsfeldes und d' die dimensionslose Ortsauflösung dar. Die zufällige Messabweichung wird zunächst nicht betrachtet, da für die Messung der Suspensionsströmung keine Anforderungen an die zeitliche Auflösung bestehen. Daher kann die zufällige Messabweichung mit größerer Mittlungsdauer reduziert werden. Die systematische Messabweichung der x -Komponente Δv_x wird aus der Messung am lateralen Geschwindigkeitsnormal bestimmt. Entsprechend wird die y -Komponente Δv_y aus der Messung am axialen Geschwindigkeitsnormal bestimmt:

$$\Delta v_x(x,y) = v_x(x,y) - v_{norm,axial} \quad (4.2)$$

$$\Delta v_y(x, y) = v_y(x, y) - v_{\text{norm,lateral}} \quad (4.3)$$

Von diesen Skalarfeldern wird anschließend die mittlere relative Messabweichung gebildet:

$$F_{\bar{v}_x, \text{sys}} = \frac{\overline{\Delta v_x}}{v_{\text{norm,axial}}} = \frac{\frac{1}{XY} \sum_x^X \sum_y^Y |\Delta v_x(x, y)|}{v_{\text{norm,axial}}} \quad (4.4)$$

$$F_{\bar{v}_y, \text{sys}} = \frac{\overline{\Delta v_y}}{v_{\text{norm,lateral}}} = \frac{\frac{1}{XY} \sum_x^X \sum_y^Y |\Delta v_y(x, y)|}{v_{\text{norm,lateral}}}, \quad (4.5)$$

Dabei bezeichnen X und Y die Anzahl der Geschwindigkeitsvektoren in x - und y -Richtung im Messbereich. Die dimensionslose Ortsauflösung berechnet sich aus:

$$d' = \max \left(\frac{d - d_{\text{soll}}}{d_{\text{soll}}}, 0 \right), \quad (4.6)$$

wobei d die tatsächliche Ortsauflösung und d_{soll} die geforderte Ortsauflösung von mindestens $d_{\text{soll}} = 1,75 \text{ mm}$ darstellt. Aus diesem Zusammenhang folgt, dass eine Verbesserung der Ortsauflösung jenseits der geforderten Ortsauflösung die Zielfunktion nicht verringert. Die Ortsauflösung ist durch die Größe der Interrogation Windows gegeben. Für die Optimierung werden die Ultraschallfrequenz f und die Größe der Interrogation Windows l_{iw} , welche im Folgenden als Vielfaches der Wellenlänge $l_{\text{iw,l}} = \frac{l_{\text{iw}}}{\lambda}$ angegeben wird, betrachtet. Die Ultraschallfrequenz f ist ein wesentlicher Parameter bei der Messung der Suspensionsströmung, da die Streuung an den Zinkpartikeln wellenlängenabhängig ist. Mit der Ultraschallfrequenz ändert sich die Größe der abgebildeten Strukturen. Für die korrelationsbasierte Geschwindigkeitsauswertung ist es entscheidend, dass ausreichend detaillierte Strukturen in einem Interrogation Window vorhanden sind. Daher muss mit der Ultraschallfrequenz auch die Größe der Interrogation Windows optimiert werden. Um für diese Parameter einen optimalen Arbeitspunkt zu finden, werden mehrere Messungen mit allen Kombinationen der folgenden Werte durchgeführt:

- $f = [2,5; 6,5] \text{ MHz}$, Schrittgröße: $0,5 \text{ MHz}$
- $l_{\text{iw,l}} = [2; 7]$, Schrittgröße: 1

Der genutzte Messbereich befindet sich zentral vor dem Ultraschall-Array in einem Abstand von 5 mm und hat eine Ausdehnung von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (siehe Abbildung 4.6). Die für die Messung am Kalibrierstand verwendeten Parameter sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Die Geschwindigkeitsschätzung erfolgt entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 2.3.2. Zur Ermittlung eines Geschwindigkeitswertes werden dabei n_{epp} Ultraschallbilder verwendet. Es werden dazu jeweils zwei aufeinanderfolgende Bilder korreliert, woraus sich $n_{\text{epp}} - 1$ Korrelationsfunktionen ergeben. Aus dem arithmetischen Mittel dieser Korrelationsfunktionen wird die Verschiebung für jedes Interrogation Window bestimmt.

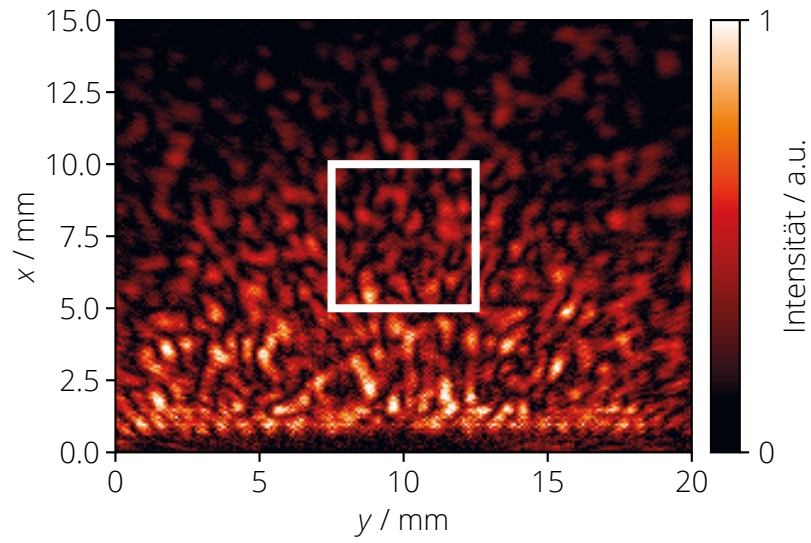


Abbildung 4.6: Ultraschallbild der Suspension während der Messung im lateralen Geschwindigkeitsnormal. Die genutzte Messregion ist als weißes Quadrat gekennzeichnet.

Tabelle 4.4: Parameter für die Messung am Geschwindigkeitsnormal.

Parameter	Axiales Geschwindigkeitsnormal	Laterales Geschwindigkeitsnormal
v_{st}	2 mm s^{-1}	5 mm s^{-1}
Anzahl Ultraschallelemente	64	64
Pulswiederholrate f_{prf}	30 Hz	150 Hz
n_{epp}	250	250
Anzahl der aufgenommenen Geschwindigkeitsfelder N	10	11
Messzeit	8,3 s	13,3 s

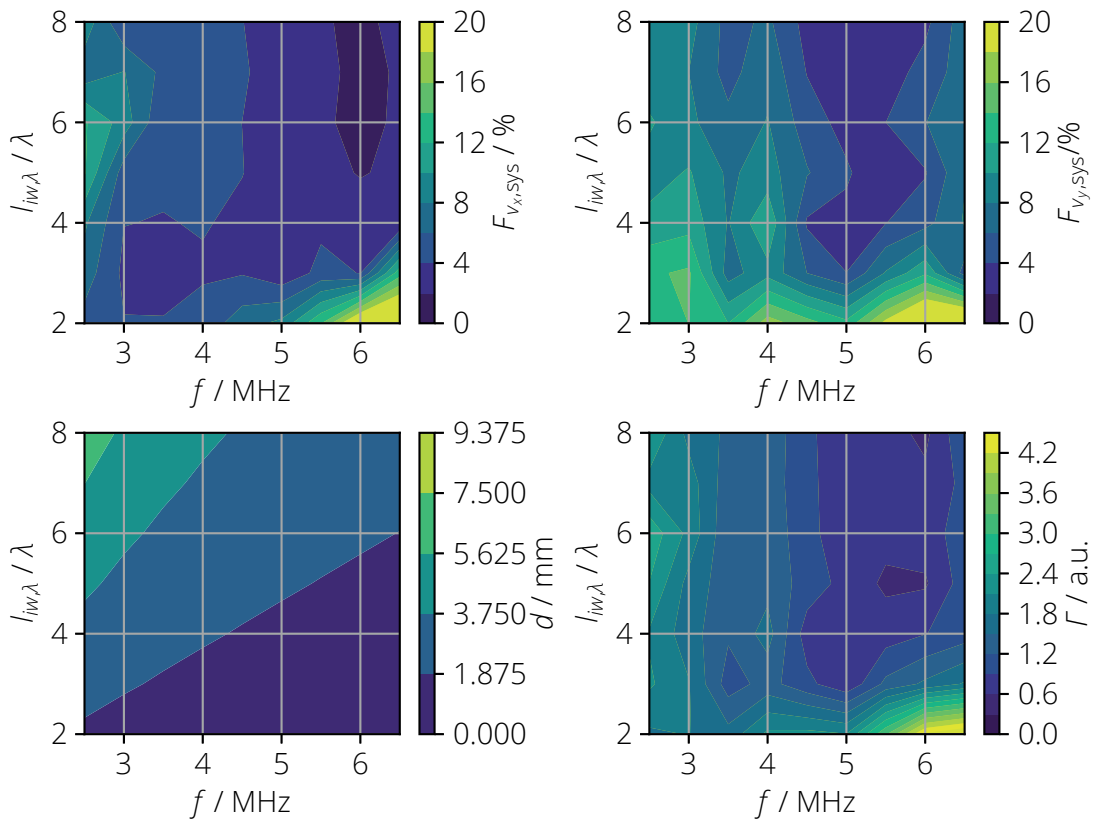


Abbildung 4.7: Oben: relative Messabweichung der axialen (links) und der lateralen Strömungskomponente (rechts), Unten: örtliche Auflösung (links) und Zielfunktion (rechts).

In Abbildung 4.7 ist das Ergebnis der Messung am Geschwindigkeitsnormal in Form der relativen systematischen Messabweichung für die x- und y-Komponente $F_{\tilde{v}_x,sys}$ und $F_{\tilde{v}_y,sys}$, der Ortsauflösung d und der Zielfunktion Γ dargestellt. Der optimale Arbeitspunkt befindet sich bei einer Frequenz von $f = 6 \text{ MHz}$ und einer Fenstergröße von $l_{w,\lambda} = 5$. An diesem Arbeitspunkt wird eine Ortsauflösung von $d = 1,66 \text{ mm}$ erreicht, womit die Anforderungen an das Messsystem erfüllt werden. Die Ortsauflösung kann zusätzlich reduziert werden. Allerdings steigt in diesem Fall die systematische Messabweichung an.

4.3.3 Charakterisierung der Messeigenschaften

Im vorangegangenen Abschnitt konnte ein optimaler Arbeitspunkt für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in der Zinksuspension mittels UIV gefunden werden. In diesem Abschnitt soll die anhand des Kalibrierstandes ermittelte Messunsicherheit ange-

geben werden.

Für den optimalen Arbeitspunkt ergibt sich eine systematische Messabweichung von $F_{\bar{v}_x,sys} = 1,8\%$ und $F_{\bar{v}_y,sys} = 3,8\%$ für die x- und y-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit. Für die in Tabelle 4.4 angegebenen Parameter kann die zufällige Messabweichung $s_{v_x}(x,y)$ und $s_{v_y}(x,y)$ für die x- und y-Komponente als die Standardabweichung über die Anzahl der aufgenommenen Geschwindigkeitswerte berechnet werden. Die mittlere, relative zufällige Messabweichung ergibt sich dann als:

$$F_{v_x,zuf} = \frac{\frac{1}{XY} \sum_x^X \sum_y^Y s_{v_x}(x,y)}{V_{norm,axial}} \quad (4.7)$$

$$F_{v_y,zuf} = \frac{\frac{1}{XY} \sum_x^X \sum_y^Y s_{v_y}(x,y)}{V_{norm,lateral}}. \quad (4.8)$$

Entsprechend des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [71] kann die Gesamtunsicherheit für die x- und y-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit als:

$$F_{\bar{v}_x} = \sqrt{\left(\frac{F_{\bar{v}_x,sys}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v_x,zuf}}{\sqrt{N}}\right)^2} \quad (4.9)$$

$$F_{\bar{v}_y} = \sqrt{\left(\frac{F_{\bar{v}_y,sys}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v_y,zuf}}{\sqrt{N}}\right)^2}. \quad (4.10)$$

berechnet werden. Dabei beschreibt N die Anzahl der aufgenommenen Geschwindigkeitsfelder. Für die Messung am Kalibrierstand ergibt sich bei einer Ortsauflösung von $d = 1,66\text{ mm}$ eine Messunsicherheit von $F_{\bar{v}_x} = 2,5\%$ und $F_{\bar{v}_y} = 4,1\%$ für die x- und y-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit. In realen Geschwindigkeitsfeldern liegt in der Regel ein Geschwindigkeitsgradient vor. Die begrenzte Auflösung des Messsystems führt in diesem Fall zu einer Messabweichung, welche vom Strömungsfeld abhängt. Dieser Unsicherheitsbeitrag wurde hier nicht betrachtet. Die Ortsauflösung orthogonal zur Messebene, also in z-Richtung, wurde anhand einer Schallfeldsimulation für die Flüssigphase ohne Zinkpartikel (Elektrolyt) bestimmt. Sie liegt im Messbereich zwischen 2 ... 3 mm. Die daraus resultierende Messunsicherheit wird aufgrund der geringen Variation des Strömungsfeldes im Messbereich in z-Richtung vernachlässigt.

4.3.4 Validierung

Ziel der Validierung ist es, die UIV zur Messung eines realen Strömungsfeldes anzuwenden und mit einer Referenz zu vergleichen. Existieren Gradienten im Strömungsfeld spielt die Wahl der Subpixel-Interpolationsmethode eine wesentliche Rolle für die Qualität des Messergebnisses. Die Wahl einer geeigneten Methode lässt sich anhand der Messung am Kalibrierstand nicht treffen. Die Untersuchung erfolgt daher anhand

der Validierungsmessung.

Untersucht wird die Strömung von Glyzerin im Modellexperiment, siehe Abbildung 4.1. Aufgrund der Newtonschen Eigenschaften und der hohen Viskosität des Fluides kann von einer stationären, laminaren Strömung ausgegangen werden. Diese lässt sich mittels Computational-Fluid-Dynamics-Simulation (dt.: Simulation mittels numerischer Strömungsmechanik) (CFD-Simulation) mit vernachlässigbaren Abweichungen (verglichen mit der Ultraschallmessung) beschreiben, und die Simulation kann somit als Referenz dienen. Die Strömungssimulationen wurden durch den Projektpartner Lukas Feierabend vom ZBT GmbH Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH, Duisburg erstellt. Die Parameter für die Messung sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Vergleich der Subpixel-Interpolationsmethoden

Bei der UIV wird zur Bestimmung der Verschiebung der Strukturen oder Partikel in einem Interrogation Window eine Korrelation durchgeführt und anschließend das Maximum dieser lokalisiert, siehe Abschnitt 2.3.2. Die zweidimensionale Korrelationsfunktion hat dabei die gleiche Ortsauflösung wie die verwendeten Ultraschallbilder. Um die Verschiebung mit einer Genauigkeit zu bestimmen, die kleiner ist als die Bildauflösung, werden Subpixel-Interpolationsmethoden eingesetzt [54, 72]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Methoden untersucht: Schwerpunktschätzung, parabolische Interpolation und Gaußsche Interpolation. Da sich für die Schwerpunktschätzung und die parabolische Interpolation keine signifikanten Unterschiede feststellen ließen, wird im Folgenden stellvertretend nur die parabolische Interpolation betrachtet und mit der Gaußschen Interpolation verglichen.

In Abbildung 4.8 sind die Ergebnisse der Strömungsmessung und der Simulation dargestellt. Für die Verwendung der Subpixel-Interpolationsmethoden ergeben sich signifikante Unterschiede in der Qualität der Messung. Qualitativ stimmt das gemessene Strömungsfeld mit der parabolischen Interpolation sehr gut mit der Simulation überein. Die mit der Gaußschen Interpolation ermittelten Ergebnisse weichen von der Simulation ab. Die Ausbreitung der Strömung am Einlass ist verschieden und es werden signifikante Geschwindigkeiten an der oberen und unteren Wand gemessen. Dies weicht nicht nur von der Simulation ab, sondern ist auch aufgrund der Haftbedingung für Glyzerin physikalisch nicht sinnvoll. In den Geschwindigkeitsprofilen in Abbildung 4.12b ist außerdem ersichtlich, dass die Profile für die Gaußsche Interpolation nicht erklärbare Schwankungen aufweisen, beispielsweise für $x = 2,5 \text{ mm}$ und $y = 10 \text{ mm}$. In Abbildung 4.9 ist die empirische Standardabweichung der Geschwindigkeit s_v dargestellt welche als:

$$s_v = \sqrt{s_{v_x}^2 + s_{v_y}^2} \quad (4.11)$$

berechnet wurde. Dabei stellen s_{v_x} und s_{v_y} die Standardabweichung der gemessenen Geschwindigkeiten in x - und y -Richtung dar. Für die Gaußsche Interpolation ergibt sich über den größten Teil des Messfeldes eine wesentlich größere Standardabweichung. Nur im Bereich der Einströmung ist diese für die parabolische Interpolation größer. Da

jedoch die qualitative Strömungsstruktur wesentlich besser wiedergegeben werden kann, die Standardabweichung über das Messfeld wesentlich geringer ist und keine Artefakte bei der wandnahen Messung auftreten, wird im Folgenden die parabolische Interpolationsmethode verwendet.

Vergleich von UIV und Simulation

Für den Vergleich von Simulation und Messung werden die Messergebnisse für die parabolische Interpolationsmethode betrachtet werden. Das mit der UIV gemessene und das simulierte Strömungsfeld stimmen qualitativ gut überein. Bei Betrachtung der Strömungsprofile der x -Komponente der Strömung in 4.12b zeigt sich, dass die hohen Geschwindigkeiten am Einlass des Kanals durch die UIV unterschätzt werden. Befindet sich in einem Interrogation Window ein Geschwindigkeitsgradient, so kommt es einerseits zu einer Verbreiterung der Korrelationsfunktion. Andererseits kann die Korrelationsfunktion eine Schiefe in Richtung kleinerer Verschiebungen aufweisen, wenn die abgebildeten Strukturen und Partikel groß sind [73]. Dies führt im Bereich der Einströmung, wo der Geschwindigkeitsgradient groß ist, zu einer Unterschätzung der Strömungsgeschwindigkeit. Eine Erhöhung der Bildrate führt zu einer Reduktion der Abweichung am Einlass. Allerdings führt eine hohe Bildrate in Messregionen mit geringer Geschwindigkeit zu einer nicht tolerierbaren Messabweichung. Die Bildrate wurde daher so gewählt, dass die Messabweichung im Hauptkanal möglichst klein ist. Für $x > 5 \text{ mm}$ ist die Abweichung der Ultraschallmessung von der Simulation kleiner als 9 %.

Tabelle 4.5: Parameter für die Messung der Glyzerinströmung im Modellexperiment

Parameter	Wert
Fluid	Glyzerin (Reagenzienqualität, Reinheit > 99 %), Schallgeschwindigkeit: 1923 m s^{-1}
Streupartikel	Polyamid-Partikel, mittlerer Durchmesser $20 \mu\text{m}$
Volumenstrom	$2064 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$
Messung	
Anregungssignal	Mittenfrequenz $f = 6 \text{ MHz}$, 2 Perioden, Rechteckimpuls
Ultraschallwandler	Imasonic-Array (vgl. 3.2.2), 50 Ultraschallwandlerelemente genutzt
Pulswiederholrate f_{prf}	25 Hz
Anzahl der aufgenommenen Bilder	620
Bildgebung	
Clutter-Filter	ja
Größe eines Gates	1λ
Anzahl der Gates pro Wellenlänge	4
Strahlformer	DAS
Untere und obere Grenzfrequenz des verwendeten Bandpassfilters	3 MHz, 7,2 MHz
Geschwindigkeitsschätzung	
Anzahl Bilder für eine Geschwindigkeitsschätzung n_{epp}	31
Kantenlänge der Interrogation Windows l_{iw}	1 mm
Überlapp der Interrogation Windows	50 %
Subpixel-Interpolationsmethode	Gaußsche Interpolation, parabolische Interpolation

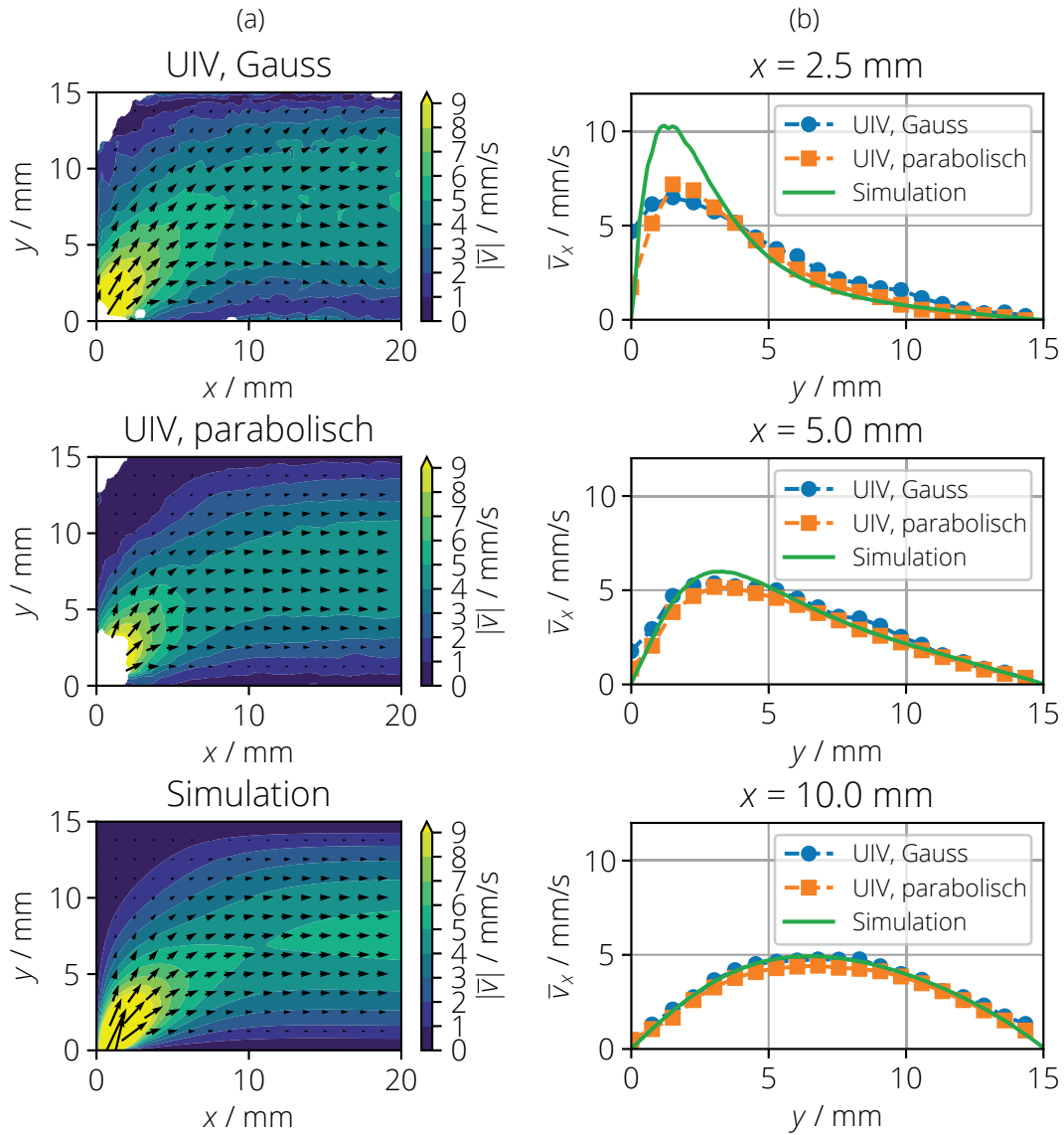


Abbildung 4.8: (a) Gemessene Geschwindigkeitsfelder für UIV mit Gaußscher (oben) und parabolischer (mittig) Subpixel-Interpolation sowie das simulierte (unten) Geschwindigkeitsfeld für Glycerin. Messpunkte an denen die Standardabweichung der Geschwindigkeit größer als 2 mm s^{-1} ist, wurden weiß maskiert. (b) Strömungsprofile der x-Komponente der Strömung an ausgewählten x-Positionen.

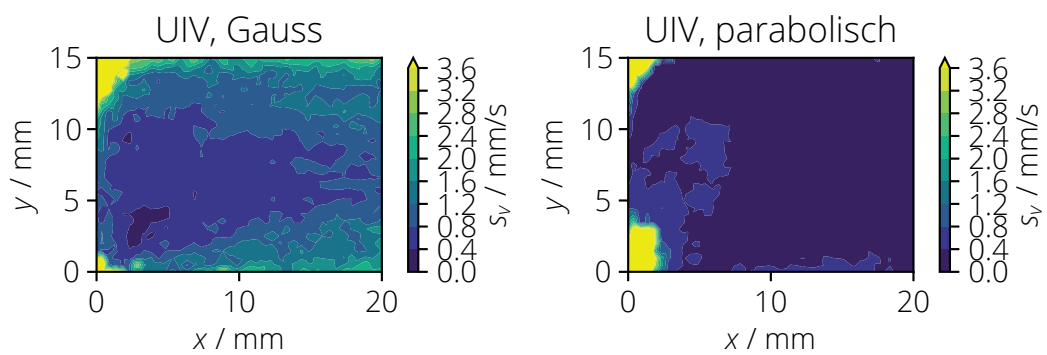


Abbildung 4.9: Standardabweichung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit für UIV mit Gaußscher (links) und parabolischer (rechts) Subpixel-Interpolation.

4.4 Messung der Suspensionsströmung im Modellexperiment

In diesem Abschnitt wird die Messung der Suspensionsströmung im Modellexperiment vorgestellt. Damit soll die Anwendbarkeit der optimierten UIV zur Messung von 2D2C-Strömungsfeldern in Suspensionen gezeigt werden. In Abschnitt 4.4.1 werden zunächst die Messergebnisse vorgestellt. Diese werden in Abschnitt 4.4.2 mit numerischen Simulationen verglichen.

4.4.1 Messergebnisse

Für die Messung im Modellexperiment wurden die in Tabelle 4.6 angegebenen Parameter verwendet. Vergleichend wird der Messung der Zinksuspension eine Messung der Strömung der reinen Flüssigphase ohne Zinkpartikel (dem Elektrolyt) gegenübergestellt. Dadurch wird einerseits demonstriert, dass die Messung im beladenen Fluid notwendig ist, da sich das Strömungsfeld aufgrund der Partikelbeladung verändert. Andererseits kann anhand des Vergleiches die Komplexität der rheologischen Eigenschaften der Zinksuspension und damit die Notwendigkeit der Strömungsuntersuchung gezeigt werden. Die gemessenen Strömungsfelder sowie ausgewählte Geschwindigkeitsprofile der Geschwindigkeitskomponente v_x und die zugehörigen Messunsicherheiten $\sigma_{\bar{v}_x}$ sind in Abbildung 4.10 und 4.11 dargestellt. Für beide Fluide weist das Strömungsfeld eine starke Asymmetrie am Einlass ($x = 0$ mm) auf. Für das Elektrolyt führt das Moment von der Einströmung (y -Richtung) zu einer schnellen Ausbreitung des Strömungsprofils über die gesamte Kanalbreite und es bildet sich ein flaches Strömungsprofil mit einer Neigung aus. Im Gegensatz dazu bildet sich für die Zinksuspension eine größere Zone gegenüber der Einströmung aus, in welcher nahezu keine Bewegung stattfindet. Das Strömungsprofil weist eine eher parabolische Form auf.

Es soll nun zunächst die bei der Messung auftretende Messunsicherheit (siehe Abbildung 4.11) betrachtet werden. Diese setzt sich aus einer Unsicherheit aufgrund der systematischen Messabweichung $\sigma_{\bar{v}_x, \text{sys}}$, einer Unsicherheit aufgrund der zufälligen Messabweichung $\sigma_{\bar{v}_x, \text{zuf}}$ und einer Unsicherheit aufgrund der begrenzten örtlichen Auflösung des Messverfahrens $\sigma_{\bar{v}_x, \text{res}}$ wie folgt zusammen:

$$\sigma_{v_x} = \sqrt{\sigma_{\bar{v}_x, \text{sys}}^2 + \sigma_{\bar{v}_x, \text{zuf}}^2 + \sigma_{\bar{v}_x, \text{res}}^2} \quad (4.12)$$

Die einzelnen Unsicherheitsbeiträge können wie folgt bestimmt werden:

- Unsicherheit aufgrund der systematischen Messabweichung:

$$\sigma_{\bar{v}_x, \text{sys}} = F_{\bar{v}_x, \text{sys}} \frac{\bar{v}_x}{\sqrt{3}} \quad (4.13)$$

wobei $F_{\bar{v}_x, \text{sys}}$ die am Kalibrierstand festgestellte relative systematische Messabweichung darstellt. Aufgrund der Größe der Interrogation Windows von $l_{\text{IW}} = 3\lambda =$

Tabelle 4.6: Parameter für die Messung der Suspensionsströmung und der Elektrolytströmung im Modellexperiment.

Parameter	Wert Zinksuspension/Elektrolyt
Fluide	Zinksuspension ($\nu = 8$ vol.-%, Partikelklasse 1), Elektrolyt (Zusammensetzung entspricht der Zinksuspension ohne Partikel)
Streupartikel (nur für das Elektrolyt)	Polyamid-Partikel, mittlerer Durchmesser $20\text{ }\mu\text{m}$
Volumenstrom	$1730\text{ mm}^3\text{ s}^{-1}$
Messung	
Anregungssignal	Mittenfrequenz $f = 6\text{ MHz}$, 2 Perioden, Rechteckimpuls
Ultraschallwandler	Imasonic-Array (vgl. 3.2.2), 50 Ultraschallwandlerelemente genutzt
Pulswiederholrate f_{prf}	$300\text{ Hz}/32\text{ Hz}$
Anzahl der aufgenommenen Bilder	15000/1250
Bildgebung	
Clutter-Filter	ja
Größe eines Gates	1λ
Anzahl der Gates pro Wellenlänge	4
Strahlformer	DAS
Untere und obere Grenzfrequenz des verwendeten Bandpassfilters	3 MHz , $7,2\text{ MHz}$
Geschwindigkeitsschätzung	
Anzahl Bilder für eine Geschwindigkeitsschätzung n_{epp}	250/31
Kantenlänge der Interrogation Windows l_{iw}	1 mm
Überlapp der Interrogation Windows	50 %
Subpixel-Interpolations- methode	Gaußsche Interpolation, parabolische Interpolation
Ausreißertest	Median-Test: Übersteigt die Geschwindigkeit den Median der acht umliegenden Geschwindigkeitswerte um mehr als 1 mm s^{-1} wird dieser verworfen.

1 mm beträgt diese $F_{\bar{v}_x, \text{sys}} = 3,9\%$. Diese wird entsprechend des GUM [71] als maximale systematische Messabweichung interpretiert.

- Unsicherheit aufgrund der zufälligen Messabweichung:

$$\sigma_{\bar{v}_x, \text{zuf}} = \frac{s_{v_x}}{\sqrt{N}} \quad (4.14)$$

wobei s_{v_x} die empirische Standardabweichung aller Messungen und N die Anzahl der Messungen darstellen. Die einzelnen Messungen werden als unkorreliert betrachtet.

- Unsicherheit aufgrund der begrenzten örtlichen Auflösung des Messverfahrens:

$$\sigma_{\bar{v}_x, \text{res}} = \frac{l_{\text{iw}}}{2\sqrt{3}} \frac{\partial v_{x, \text{sim}}}{\partial y} \quad (4.15)$$

wobei $\frac{\partial v_{x, \text{sim}}}{\partial y}$ den aus einer CFD-Simulation abgeschätzten Gradienten des Strömungsprofils und l_{iw} die Größe der Interrogation Windows und damit die erreichte Ortsauflösung darstellen. Für die Abschätzung von $\sigma_{\bar{v}_x, \text{res}}$ wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Geschwindigkeitsgradient in einem Interrogation Window konstant ist und die maximale systematische Messabweichung bestimmt und nach GUM [71] in eine Messunsicherheit überführt.

Die Messunsicherheit wird für beide Fluide an Positionen mit einem hohen Geschwindigkeitsgradienten durch die begrenzte Ortsauflösung und sonst durch die zufällige und systematische Messabweichung dominiert. Die maximal auftretende Messunsicherheit beträgt $\approx 1 \text{ mm s}^{-1}$. Für den zentralen Bereich des Kanals für $2,5 \text{ mm} \leq y \leq 12,5 \text{ mm}$ ist die Messunsicherheit $\sigma_{\bar{v}_x} < 0,5 \text{ mm s}^{-1}$. Sie ist somit über den wesentlichen Teil der Strömungsprofile kleiner als die Differenz der Geschwindigkeiten zwischen Suspension und Elektrolyt. Die Unterschiede können folglich nicht auf die Messunsicherheit zurückgeführt werden. Daher sollen die Unterschiede im Folgenden genauer betrachtet werden.

Um Strömungsfelder zu vergleichen, wird oftmals die Reynolds-Zahl verwendet. Um die modifizierten Reynolds-Zahlen für die vorliegenden nicht-Newtonschen Fluide zu bestimmen, wird ein erweitertes Herschel-Bulkley-Modell (HB-Modell) an die jeweilige Fließkurve gefittet [68]. Die Fließkurve wurde mit einem Rotationsrheometer mit glatten Oberflächen erzeugt. Eine Schätzung der modifizierten Reynolds-Zahlen ergibt $Re_{\text{el}} = 0,022$ für das Elektrolyt und $Re_{\text{susp}} = 0,014$ für die Zinksuspension im Hauptkanal. Da beide Reynoldszahlen $Re < 1$, werden die Strömungsfelder durch die innere Reibung des Fluides bestimmt und die Strömungsprofile und Scherraten hängen hauptsächlich von der Verteilung der Scherspannung und damit von der Verteilung der Viskosität ab und umgekehrt. Allein anhand der Reynolds-Zahlen und minimaler Unterschiede der integralen Strömungsregime kann der Unterschied zwischen Zinksuspension und Elektrolyt nicht erklärt werden.

Für beide Fluide kann ein Wandgleiten [74] festgestellt werden, welches für das Elektrolyt besonders stark ausgebildet ist. Dieser Effekt wurde in der Literatur für derartige Mikrogele basierend auf Polyacrylsäure (Bindemittel für das Elektrolyt) mehrfach beschrieben [15, 75]. Die Wandgleitgeschwindigkeit hängt unter Anderem vom Material und der Rauigkeit der Wand ab [76]. Dabei ist der Einfluss des Wandgleitens einerseits und der Einfluss der rheologischen Eigenschaften der kontinuierlichen Phase andererseits oft nicht eindeutig trennbar. So führen sowohl ein erhöhtes Wandgleiten (beispielsweise aufgrund einer glatteren Wand) als auch eine höhere Fließgrenze (rheologische Eigenschaft) zur Ausbildung eines pfropfenförmigen Profils. Für das Elektrolyt bildet sich ein wesentlich stärker pfropfenförmiges Profil aus als für die Zinksuspension. Das eher parabolische Strömungsprofil der Zinksuspension im Gegensatz zum Elektrolyt könnte wie folgt erklärt werden: Suspensionen können thixotrope Eigenschaften aufweisen [77–79]. Das bedeutet, dass die internen Strukturen des Fluides unter Scherung aufgebrochen werden und die Viskosität mit der Zeit sinkt. Andererseits kann die interne Struktur in Zonen mit sehr geringer Scherung wieder aufgebaut werden, wodurch die Viskosität über die Zeit steigt. Die Restrukturierung findet im vorliegenden Fall in der Totzone statt, so dass sich das Fluid lokal nahezu wie ein Festkörper verhält, also eine sehr hohe Viskosität aufweist. Nahe dem Einlass hingegen wird die Zinksuspension stark geschert und die Viskosität ist um Größenordnungen geringer, was zu einem eher parabolischen Strömungsprofil führt. Im Ergebnis kann der Unterschied zwischen Zinksuspension und Elektrolyt also durch die thixotropen Eigenschaften der Suspension erklärt werden [68].

Bisher wurde die dem Einlass gegenüberliegende Zone als Totzone bezeichnet, da hier nahezu keine Strömung auftritt. Bei genauerer Betrachtung der Strömungsprofile der Zinksuspension bei $x = 4 \text{ mm}$ und $x = 8 \text{ mm}$ wird jedoch ersichtlich, dass in dieser Totzone eine im Vergleich zur Hauptströmung kleine Rückströmung auftritt. Dies kann bis jetzt aus strömungsmechanischer Sicht nicht erklärt werden. Es sollten daher weitere Strömungsuntersuchungen der Zinksuspension durchgeführt werden, um die strömungsmechanischen Eigenschaften besser zu verstehen und die vorliegenden Messungen zu bestätigen.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Zinksuspension komplexe rheologische Eigenschaften aufweist, welche vom gleichen Fluid ohne Partikel stark abweichen. Für die Validierung und Kalibrierung numerischer Modelle, die derartige Strömungen abbilden, ist also eine direkte Messung der Suspensionsströmung unerlässlich. Im Ergebnis dieses Abschnitts konnte gezeigt werden, dass die optimierte UIV zur Messung des 2D2C-Strömungsfeldes in der Zinksuspension geeignet ist.

4.4.2 Vergleich von Simulation und Messung

Im vorangegangenen Abschnitt konnte festgestellt werden, dass die Zinksuspension komplexe rheologische Eigenschaften aufweist. Um die Kanalgeometrie der ZLFB auszulegen und die rheologischen Eigenschaften der Zinksuspension anzupassen, ist eine numerische Modellierung der Suspensionsströmung wünschenswert. Die numeri-

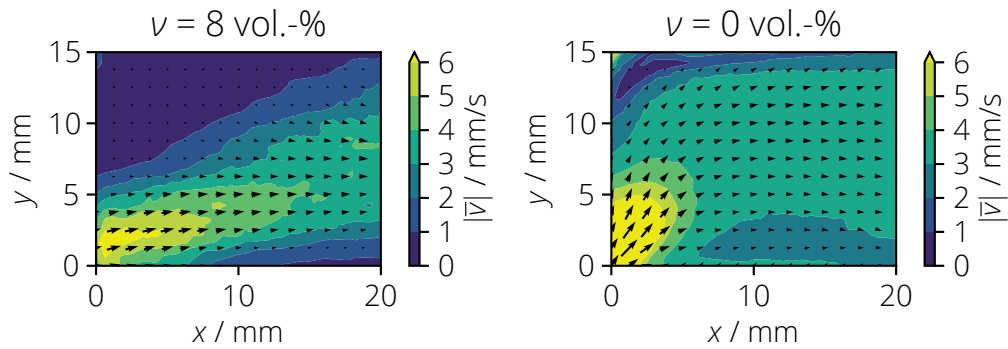


Abbildung 4.10: Gemessene Strömungsfelder für die Zinksuspension mit $\nu = 8$ vol.-% (links) und $\nu = 0$ vol.-% (rechts).

schen Modelle sollen zunächst wesentliche Eigenschaften des Strömungsfeldes, wie die festgestellte Totzone, abbilden. Im Folgenden sollen Mess- und Simulationsergebnisse verglichen werden. Die Simulationen wurden durch den Projektpartner Lukas Feierabend vom ZBT GmbH Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH, Duisburg erstellt.

Für die rheologische Modellierung der Zinksuspension wurde zunächst ein HB-Modell [80] verwendet. Dieses berücksichtigt die Fließgrenze sowie die scherratenabhängige Viskosität der Zinksuspension. Die Modellparameter wurden anhand der Messung in einem Rotationsrheometer mit glatter Oberfläche bestimmt. Die in der Zinksuspension auftretenden Effekte des Wandgleitens und der Thixotropie können mit dem HB-Modell nicht beschrieben werden. Aufgrund der Erkenntnisse aus der Messung am Modellexperiment wurde daher ein adaptiertes HB-Modell entwickelt, welches diese Effekte berücksichtigt und mit Hilfe der Strömungsmessungen parametrisiert. Details zum numerischen Modell können [81] entnommen werden.

In Abbildung 4.12 sind die Strömungsfelder für die Messungen und die beiden numerischen Modelle gegenübergestellt. Qualitativ ist zu erkennen, dass die Totzone mit dem HB-Modell nicht abgebildet werden kann. Durch das adaptierte Modell hingegen können Größe und Entwicklung der Totzone hinreichend gut nachgebildet werden.

Bei Betrachtung der Strömungsprofile der x-Komponente lassen sich allerdings Abweichungen zwischen Simulation und Messung feststellen. Die Form des Strömungsprofils sowie die Position der maximalen Geschwindigkeit sind für die Simulation verschieden. Des Weiteren nimmt die integrale Geschwindigkeit (Integration in y-Richtung) für die Messung in x-Richtung ab. Daraus folgt, dass es eine Strömungskomponente aus der Messebene heraus gibt. Dieser Effekt konnte optisch bei der Messung bestätigt werden, da an der Oberseite des Kanals oberflächlich eine Strömungskomponente in z-Richtung beobachtet wurde. Um die Ursachen der Abweichung zu ermitteln und die numerischen Modelle zu verbessern, sollten weitere experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. Dabei sollten zusätzlich alternative Kanalgeometrien untersucht werden, um die strömungsmechanischen Effekte, wie die Thixotropie und das Wand-

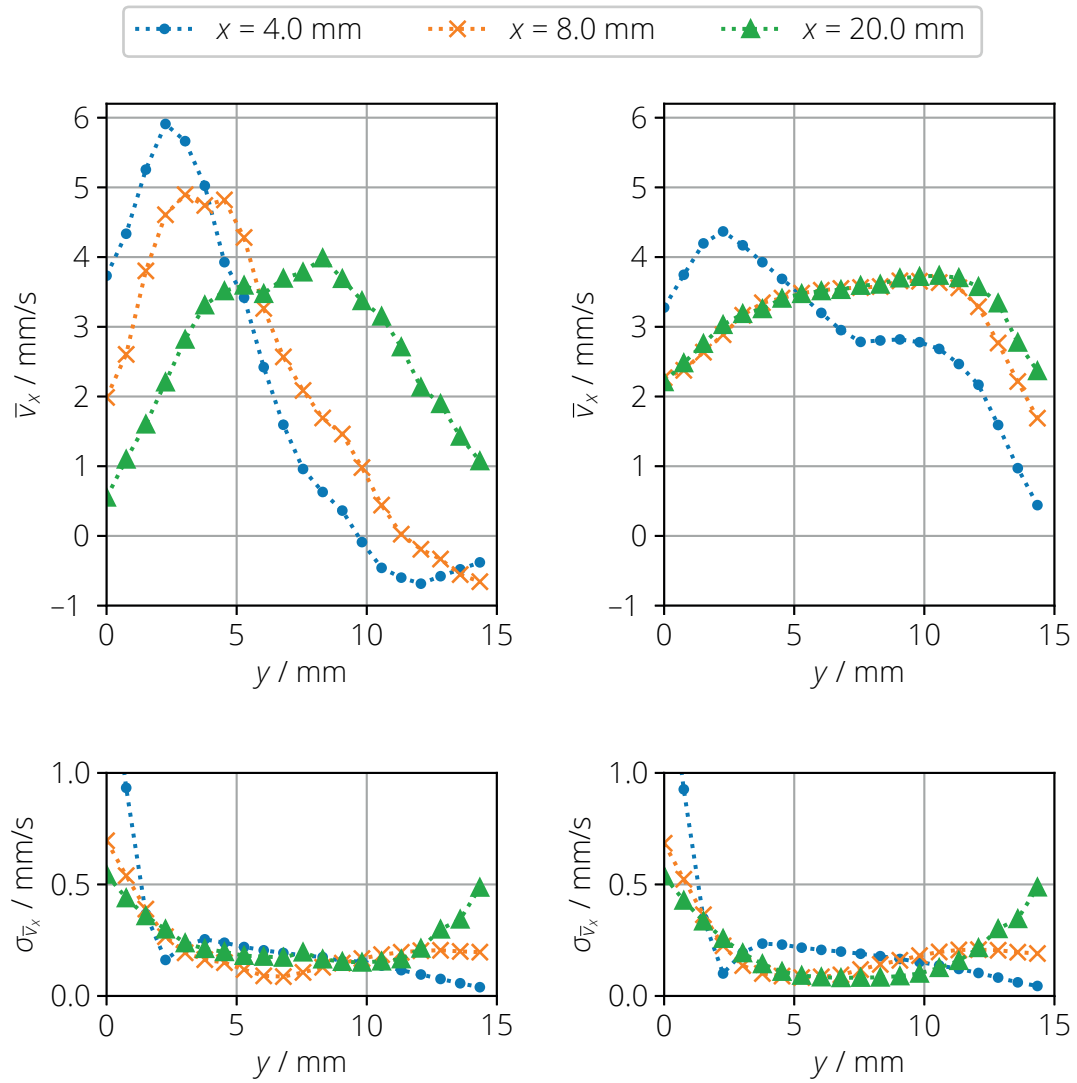


Abbildung 4.11: Oben: Strömungsprofile der Komponente v_x für ausgewählte Positionen entlang der x -Richtung. Unten: Messunsicherheit σ_{v_x} . Jeweils für die Zinksuspension mit $\nu = 8$ vol.-% (links) und $\nu = 0$ vol.-% (rechts).

gleiten, isoliert betrachten zu können.

In diesem Abschnitt konnte gezeigt werden, dass durch die Messung der Strömung im Modellexperiment ein Fortschritt für die numerische Modellierung der Zinksuspensionsströmung erzielt werden konnte. Das verbesserte Modell ist in der Lage, die gemessene Strömung qualitativ zu reproduzieren.

4.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde die UIV als Messsystem zur 2D2C-Strömungsmessung der Zinksuspension in einem Modellexperiment vorgestellt. Die UIV wurde zunächst an die Zinksuspension angepasst und die auftretende Messunsicherheit nach dem GUM anhand der Messung in einem Kalibrierstand bestimmt. Die relative Messunsicherheit in x -Richtung (axial zur Schallausbreitungsrichtung) beträgt 2,5 % und in y -Richtung (lateral zur Schallausbreitungsrichtung) 4,1 % bei einer Ortsauflösung von 1,66 mm. Das Messsystem konnte anschließend zunächst an der Glyzerinströmung validiert und schließlich zur Messung der Zinksuspensionsströmung angewendet werden. Dabei wurde die Größe der Interrogation Windows auf 1 mm reduziert und die Ortsauflösung dadurch erhöht. Im Ergebnis konnte ein wesentlicher Unterschied zwischen den simulativen Ergebnissen basierend auf dem ersten Modellansatz (HB-Modell) und der Messung der Suspensionsströmung im Modellexperiment festgestellt werden. Dies führte zur Erweiterung des in der Simulation genutzten rheologischen Modells und somit zu einer Verbesserung der numerischen Abbildung derartiger Suspensionsströmungen.

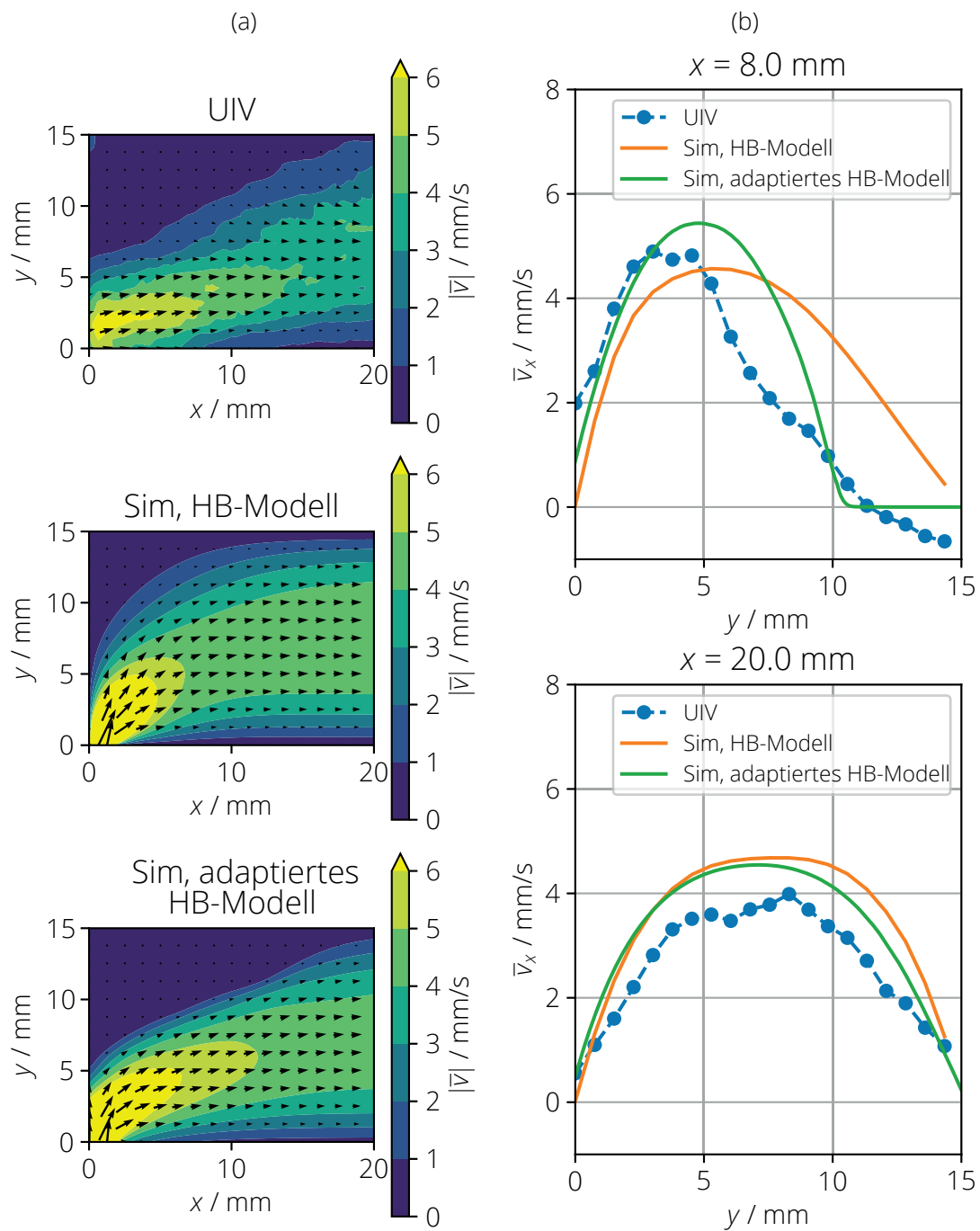


Abbildung 4.12: Vergleich der gemessenen Strömung mit einer numerischen Simulation basierend auf dem HB-Modell und dem adaptierten HB-Modell. (a) Geschwindigkeitsfelder, (b) Strömungsprofile der x-Komponente für ausgewählte Positionen entlang der x-Achse. Die Abkürzung "Sim" steht für Simulation.

5 Verfahren zur In-situ-Strömungsmessung in einer Zink-Luft-Flussbatterie

In diesem Kapitel wird ein Verfahren zur Messung der Strömung in einer aktiven Zink-Luft-Flussbatterie (ZLFB) präsentiert. Es erfolgt zunächst eine Beschreibung des experimentellen Aufbaus und der Anforderungen an das Messsystem (siehe Abschnitt 5.1). Anschließend wird in Abschnitt 5.2 der Ansatz zur Geschwindigkeitsmessung mit einer Auflösung jenseits der Beugungsgrenze vorgestellt, welcher geeignet ist, um in kleinen Geometrien wie der ZLFB eine Geschwindigkeitsmessung vorzunehmen. Darauf folgend wird das Messverfahren hinsichtlich der Ortsauflösung und Messunsicherheit charakterisiert (siehe Abschnitt 5.3). Abschließend werden in Abschnitt 5.4 die Ergebnisse der Strömungsmessung in einer aktiven ZLFB vorgestellt.

5.1 Experimenteller Aufbau

Die Ultraschallströmungsuntersuchung soll an einer aktiven ZLFB durchgeführt werden. Diese wurde beim Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH, Duisburg konstruiert und an der TU Dresden gefertigt und ist in Abbildung 5.1 als Explosionsansicht dargestellt.

Die drei grauen Platten (Nummern 1, 5 und 9 in Abbildung 5.1) bilden das Grundgerüst und wurden aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gefertigt. In diesen befinden sich Vertiefungen zur Aufnahme von Dichtringen, Stromabnehmerplatte, Stromableiter, Luft-Flowfield, Separator und Sauerstoffverzehrkatode. Zur Stabilisierung werden alle Platten miteinander verschraubt. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der ZLFB findet sich in [14].

In Abbildung 5.2 ist der Strömungskanal für die Zinksuspension in einem Schnitt dargestellt. Um eine Messung der Strömung in der Zinksuspension mittels Ultraschall zu realisieren, muss eine entsprechende Zugänglichkeit geschaffen werden. Der Ultraschall wird über die Stromabnehmerplatte eingekoppelt, so dass kein direkter Kontakt des Ultraschallwandlers zur stark basischen Zinksuspension besteht. Der Übergang von Stromabnehmerplatte zum Fluid stellt einen Impedanzsprung dar, an welchem der Ultraschall teils reflektiert und teils transmittiert wird. Für eine Stromabnehmerplatte aus Kupfer beträgt der Reflexionsfaktor am Übergang 0,89 und der überwiegende Teil des Schalls kann nicht in die Zinksuspension eingekoppelt werden. Um den reflektierten Anteil zu minimieren, wurde eine Impedanzanpassung des Stromabnehmermaterials vorgenommen. In Abschnitt 3.1.3 wurde eine akustische Impedanz der

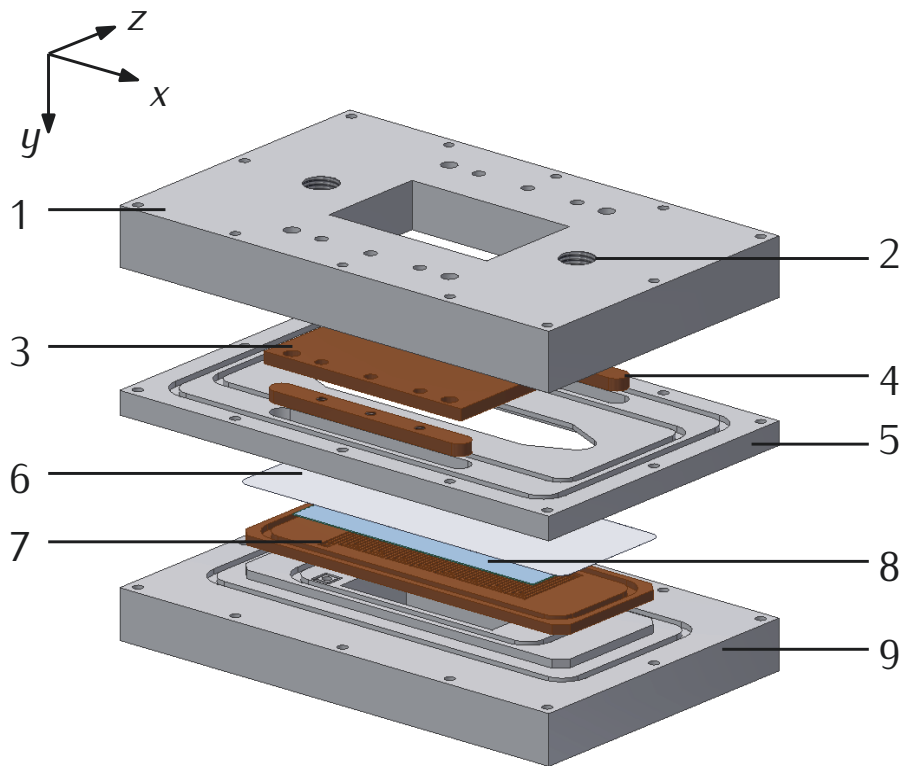


Abbildung 5.1: Explosionsansicht der ZLFB. (1) obere Abdeckplatte mit mittigem Ausschnitt als Zugang für die Ultraschallmessung, (2) Einlass für die Zinksuspension, (3) Stromabnehmerplatte aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) zum Strömungskanal zeigenden Seite mit Kupferfolie beklebt ist, (4) Stromableiter aus Kupfer zum Ableiten des elektrischen Stromes von der Stromabnehmerplatte, (5) Flowfield für die Zinksuspension, (6) Separatorfolie, (7) Flowfield für Luft (Kathodenseite), (8) Sauerstoffverzehr-Kathode (SVK), (9) untere Abdeckplatte mit Einlass für Sauerstoff.

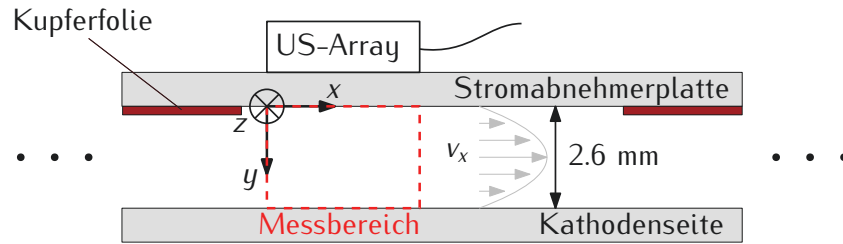


Abbildung 5.2: Schnitt durch den Strömungskanal der ZLFB. Schnittebene liegt in der x-y-Ebene mittig im Strömungskanal in z-Richtung. Der Querschnitt des Strömungskanals beträgt $2,6 \times 30 \text{ mm}^2$.

Zinksuspension von $\approx 2,5 \text{ Ns/m}^3$ ermittelt. Als ausreichend chemisch und mechanisch stabil wurde ABS identifiziert. Dieses weist eine akustische Impedanz von $\approx 2,32 \text{ Ns/m}^3$ sowie eine Schallgeschwindigkeit von 2170 m s^{-1} auf. Somit ergibt sich ein Reflexionsfaktor am Impedanzübergang von 0,05 und ein Unterschied in den Schallgeschwindigkeiten von Stromabnehmermaterial und Zinksuspension von 8 %. Es wird demzufolge der überwiegende Teil des Schalls in das Fluid transmittiert und die eingebrachten Störungen durch die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten sind gering. Da ABS nicht elektrisch leitfähig ist, wurde die Platte zum Betrieb der Batterie mit einer Kupferfolie (Dicke $35 \mu\text{m}$) beklebt, wobei der Bereich, der für die Ultraschallmessung vorgesehen ist, ausgespart wurde.

Ziel der Untersuchung an der ZLFB ist die Messung des Strömungsprofils der Hauptströmungskomponente v_x zwischen Stromabnehmer und Kathodenseite. Die Höhe des Spalts beträgt 2,6 mm. Die notwendige Ortsauflösung für die Vermessung des Geschwindigkeitsprofils kann anhand einer Computational-Fluid-Dynamics-Simulation (dt.: Simulation mittels numerischer Strömungsmechanik) (CFD-Simulation) abgeschätzt werden. Dazu wird das bereits in Abschnitt 4.4.2 genutzte Herschel-Bulkley-Modell (HB-Modell) verwendet. Für eine örtliche Auflösung von $100 \mu\text{m}$ ist die maximale relative Messabweichung allein aufgrund der begrenzten Ortsauflösung bezogen auf die maximale Geschwindigkeit im Strömungsprofil $< 25 \%$. Um eine höhere Geschwindigkeitsabweichung allein aufgrund der Ortsauflösung zu vermeiden, sollte diese also kleiner sein als $100 \mu\text{m}$. Da es sich um eine laminare und stationäre Strömung handelt, werden keine Anforderungen an die Zeitauflösung der Messung gestellt. Die Anforderungen an die Messung sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

5.2 Strömungsmessung unterhalb des Beugungslimits - Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV)

In Abschnitt 4 wurde die Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie) (UIV) zur Messung der Suspensionsströmung in einem Modellexperiment

Tabelle 5.1: Anforderungen an das Messsystem für die Messung in der aktiven ZLFB.

Eigenschaft Messobjekt	Anforderung an das Messsystem
Kanalströmung mit einer Geschwindigkeitskomponente	eindimensionale, einkomponentige (1D1C) Vermessung der Strömung im Fluidvolumen
Hohe Gradienten im Strömungsfeld aufgrund der nicht-Newtonschen Eigenschaften des Fluides	Ortsauflösung $d_{\text{soll}} \leq 100 \mu\text{m}$
Messregion über gesamt Spaltbreite und Volumenbeladung von $\approx 8 \text{ vol.-%}$ Zinkpartikeln	Eindringtiefe $\geq 3 \text{ mm}$
Betriebene elektrochemische Zelle	In-situ-Messung, einseitiger Zugang
Stark ätzendes Fluid	nicht invasive Messung
Partikelbeladenes Fluid: starke Abhängigkeit der akustischen Dämpfung und Streuung von der Ultraschallfrequenz	$f < 15 \text{ MHz}$

eingesetzt. Dabei konnte ein 2D2C-Strömungsfeld mit einer Ortsauflösung im Bereich von etwa 1 mm aufgenommen werden. Um mittels UIV die geforderte Ortsauflösung von 100 μm zu erreichen, kann die Ultraschallfrequenz erhöht werden. Dies ist allerdings aus folgenden Gründen nur begrenzt möglich:

- Durch eine Erhöhung der Ultraschallfrequenz wird die Ultraschallwellenlänge kürzer und nähert sich der Ausdehnung der Partikel an. Dadurch geht die Streuung in eine Reflexion der Schallwelle an den Partikeln über. Folglich nimmt die Eindringtiefe des Ultraschalls in die Suspension stark ab, da dieser schon an den oberflächlichen Partikelschichten reflektiert wird.
- Für die Ultraschallbildgebung wird das Phased-Array-Prinzip genutzt, wobei die maximale Frequenz von der Größe der Elemente des Phased Arrays abhängt ($\frac{\lambda}{2}$ -Kriterium). Mit herkömmlichen Materialien auf Basis von Piezos können technisch Elementgrößen bis 0,1 mm realisiert werden. Dies würde für die UIV unter der Annahme einer Fenstergröße von 3 bis 5 Wellenlängen zu einer Ortsauflösung im Bereich von 0,6 mm bis 1 mm führen.

Mit der UIV kann die geforderte Ortsauflösung folglich nicht erreicht werden.

Es wird daher ein neuartiges Verfahren zur Messung der Suspensionsströmung in kleinen Geometrien vorgestellt, welches in Abbildung 5.3 illustriert und im Folgenden als Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV) bezeichnet wird. Dieses beruht auf der Ultrasound Localization Microscopy [45] und die Grundidee lässt sich wie folgt formulieren: Gelingt es, isolierte Streukörper in der Zinksuspension abzubilden, so kann deren Position wesentlich genauer bestimmt werden, als es das Beugungslimit vorgibt. Dies wird als super-resolution bezeichnet und ermöglicht eine hohe örtliche Auflösung bei möglichst geringer Ultraschallfrequenz, so dass der Ultraschall in die Suspension eindringen kann. Die lokalisierten Partikel können anschließend verfolgt und somit eine Geschwindigkeitsmessung erreicht werden.

Für die Anwendung dieses Verfahrens, ist eine Anpassung der Ultraschallbildgebung an die messtechnischen Randbedingungen in der Zinksuspension erforderlich. Da die Dichte der Zinkpartikel zu hoch ist, um diese isoliert darzustellen, werden zusätzliche nichtlineare Streukörper (Ultraschallkontrastmittel, Mikrobläschen) in das Fluid in geringer Konzentration eingebracht. Diese werden mittels Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung) (HI) abgebildet. Auf diese Weise werden die Zinkpartikel ausgeblendet und es ist nur noch die Reflexion der Mikrobläschen sichtbar. Aufgrund der Streuung der von den Mikrobläschen ausgehenden Ultraschallwellen an den Zinkpartikeln entstehen starke Speckle und isolierte Streukörper sind in den Ultraschallbildern wiederum nicht erkennbar. Es wird daher zusätzlich ein neuartiger nichtlinearer Strahlformer eingesetzt, welcher die Speckle unterdrückt. Die dadurch isoliert abgebildeten Mikrobläschen können in nacheinander aufgenommenen Bildern verfolgt und somit die Partikelgeschwindigkeit bestimmt werden. Im Ergebnis liegt die erreichte Ortsauflösung der Geschwindigkeitsmessung unterhalb des Beugungslimits und die geforderte Ortsauflösung von < 100 μm kann erreicht werden.

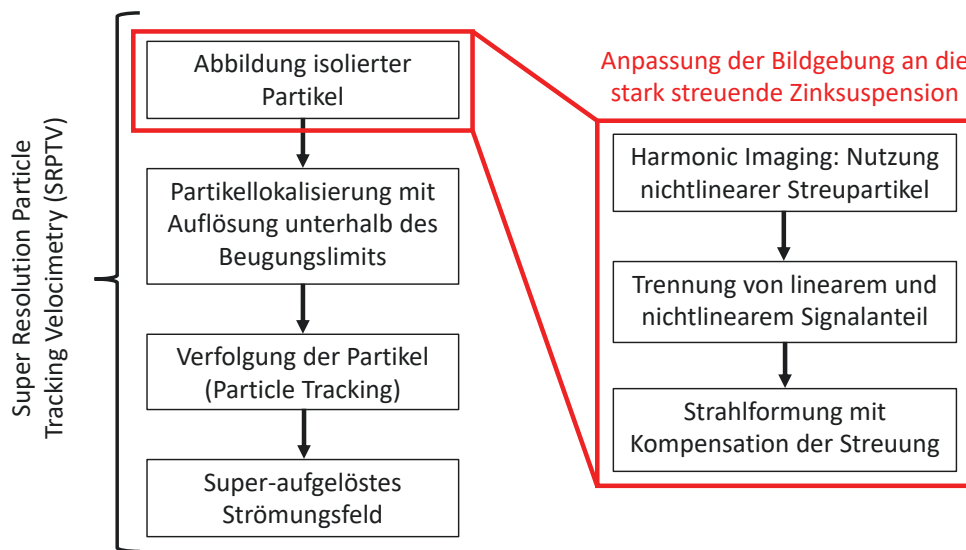


Abbildung 5.3: Prinzip der SRPTV: Partikel werden isoliert abgebildet, so dass deren Position mit einer Genauigkeit unterhalb des Beugungslimits bestimmt werden kann. Die Partikel können mittels Particle Tracking verfolgt und somit die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Um das Verfahren in der stark streuenden Zinksuspension anzuwenden, sind Anpassung bei der Ultraschallbildgebung erforderlich.

Im Folgenden sollen die einzelnen Schritte der SRPTV genauer betrachtet und Voruntersuchungen zur Anwendung in der Zinksuspension dargestellt werden.

5.2.1 Nutzung nichtlinearer Streupartikel

Für das HI werden medizinische Mikrobläschen (non-targeted ultrasound contrast agents, FUJIFILM VisualSonics, Inc., Canada [82], auch als preclinical Non Targeted MicroMarker™ bezeichnet) als nichtlineare Streupartikel genutzt. Sie bestehen aus einem Gaskern aus Decafluorbutan (C_4F_{10}) und Stickstoff (N_2), welcher von einer dünnen Phospholipidschicht umgeben ist. Der mittlere Durchmesser beträgt $1,3\ \mu m$.

Die Mikrobläschen werden vorwiegend in Blut eingesetzt, welches einen pH-Wert von etwa 7,4 hat. Damit ist es neutral bis leicht alkalisch. Die Zinksuspension ist hingegen stark alkalisch mit einem pH-Wert von 14. Es wird daher zunächst untersucht, ob die Mikrobläschen in der Zinksuspension ausreichend stabil sind. Es ist weiterhin bekannt, dass die Mikrobläschen sehr empfindlich gegenüber Druckschwankungen sind. Es wird daher untersucht, ob die Mikrobläschen durch das Pumpen der Zinksuspension zerstört werden.

Für die folgenden Untersuchungen wird der gleiche experimentelle Aufbau genutzt. 100 ml des jeweiligen Fluides werden mit $300\ \mu l$ der Mikrobläschensuspension (Mi-

schung nach Angaben des Herstellers) versetzt und in einen Behälter aus PMMA gegeben. Das Fluid wird kontinuierlich durch einen Magnetprüher gerührt, um eine gleichmäßige Verteilung der Mikrobläschen zu gewährleisten. An der Gefäßwand wird der Ultraschallwandler (Imasonic, siehe Abschnitt 3.2.2) angebracht. Für die Messung werden jeweils 100 Ultraschallpulse (Anregungsfrequenz $f_1 = 2$ MHz, 4 Perioden) ausgesandt und die Streusignale aufgezeichnet. Es kann dann die Energie E_{norm,f_2} im Frequenzband 3 ... 5 MHz um die zweite Harmonische ($f_2 = 4$ MHz) bestimmt werden, um eine Aussage über die Stabilität der Mikrobläschen zu treffen, da nur diese derartige nichtlineare Signalanteile erzeugen.

Stabilität der Mikrobläschen in der Zinksuspension

Für die Untersuchung der Stabilität der Mikrobläschen in einer stark alkalischen Lösung wird vereinfachend auf eine KOH-Lösung mit gleichem pH-Wert zurückgegriffen. Dies entspricht der verwendeten Zinksuspension ohne Bindemittel und Zinkpartikel. In Abbildung 5.4a sind die Amplitudenspektren der empfangenen Signale für die Mikrobläschen und für lineare Streupartikel aus Polyamid mit einem mittleren Durchmesser von 20 µm dargestellt. Neben der Anregungsfrequenz, also der ersten Harmonischen ($f_1 = 2$ MHz), ist ein deutlicher Signalanteil bei der zweiten Harmonischen ($f_2 = 4$ MHz) für die Mikrobläschen vorhanden. Dieser resultiert aus der nichtlinearen Interaktion der Schallwelle mit den Mikrobläschen. Für die linearen Streupartikel kann keine zweite Harmonische ($f_2 = 4$ MHz) detektiert werden. In Abbildung 5.4b ist der Abfall der Energie im Frequenzband der zweiten Harmonischen für die KOH-Lösung mit Mikrobläschen dargestellt. Entsprechend den Erwartungen sinkt die Signalenergie der zweiten Harmonischen, da sich die Mikrobläschen auflösen. Allerdings ist die Signalabnahme über einen Zeitraum von 30 min gering und eine Anwendung der Mikrobläschen in der Zinksuspension somit möglich.

Stabilität der Mikrobläschen beim Pumpen

Um zu prüfen, ob die Mikrobläschen gegenüber dem Pumpen stabil sind, wurden 100 ml Wasser mit 300 µl der Mikrobläschensuspension in den PMMA-Behälter gefüllt. Das Fluid wurde dann kontinuierlich im Kreis gepumpt und erneut Messungen mit 100 Ultraschallpulsen (Anregungsfrequenz $f_1 = 2$ MHz, 4 Perioden) durchgeführt. In Abbildung 5.5 ist die Signalenergie im Frequenzband der zweiten Harmonischen (f_2) dargestellt. Über einen Zeitraum von 9 min nimmt die Signalenergie um 3,5 dB ab, wenn das Fluid gepumpt wird. Die Reduktion der Signalenergie beträgt für den Fall in dem das Fluid nicht gepumpt wird 0,4 dB und ist somit geringer. Es werden demnach also einige der Mikrobläschen durch das Pumpen zerstört. Über einen Zeitraum von 9 min ist die Reduktion allerdings tolerierbar, und die Mikrobläschen können somit trotz des Pumpens für die Messung in der Zinksuspension verwendet werden.

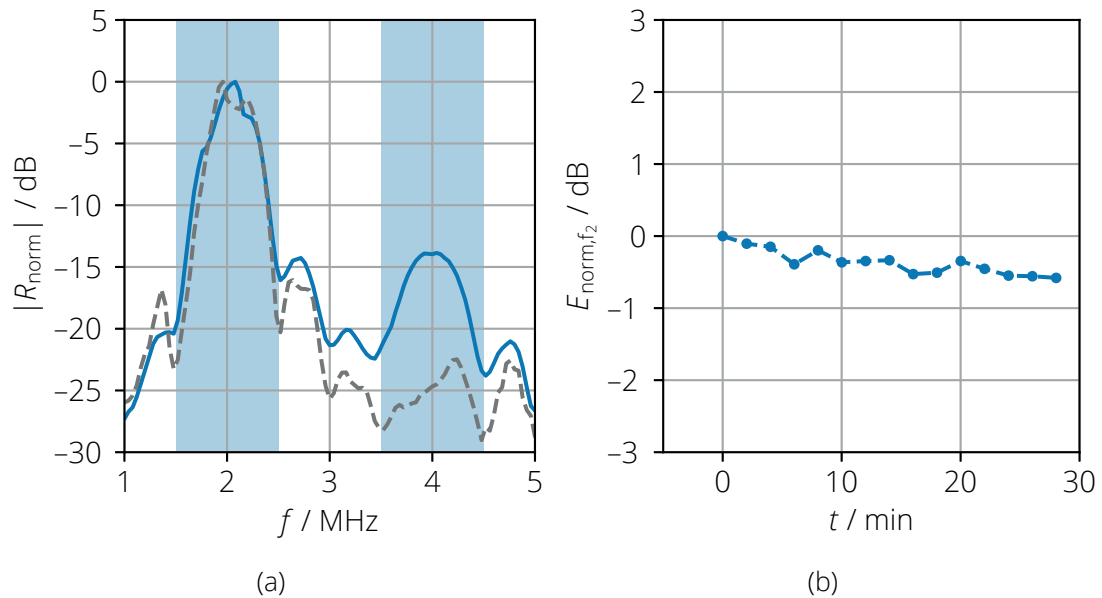


Abbildung 5.4: (a) Amplitudenspektren der empfangenen Ultraschallsignale aus der KOH-Lösung mit 300 μl der Mikrobläschensuspension (blaue Linie) sowie für Streupartikel aus Polyamid mit einem mittleren Durchmesser von 20 μm (graue gestrichelte Linie). Die Frequenzbänder für die Auswertung der Signalenergie in der ersten und zweiten Harmonischen sind blau unterlegt. Das Amplitudenspektrum wurde auf die maximale Amplitude zum Zeitpunkt $t = 0$ normiert. (b) Signalenergie im Frequenzband der zweiten Harmonischen für die KOH-Lösung mit 300 μl der Mikrobläschensuspension. Die Signalenergie wurde ebenfalls auf den Wert zum Zeitpunkt $t = 0$ normiert. Zu Gunsten einer besseren Übersichtlichkeit wurden die Messpunkte verbunden.

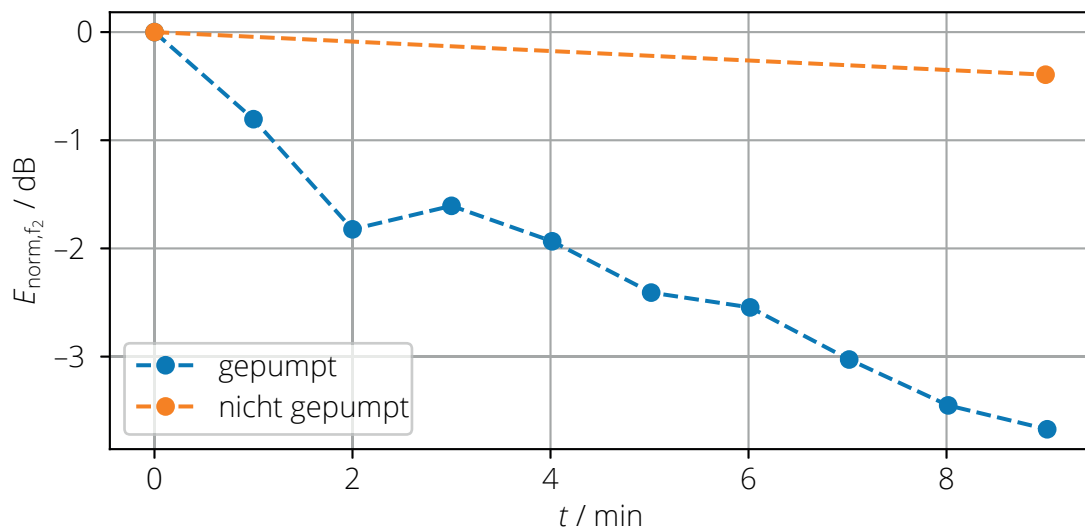


Abbildung 5.5: Signalenergie im Frequenzband (vgl. 5.4a) der zweiten (f_2) Harmonischen, wenn das Fluid gepumpt wird. Als Fluid wurden 100 ml Wasser mit 300 μ l der Mikrobläschensuspension verwendet, welche kontinuierlich im Kreis gepumpt wurden. Zum Vergleich ist eine Messung dargestellt bei welcher das Fluid nicht gepumpt wurde. Zu Gunsten einer besseren Übersichtlichkeit wurden die Messpunkte verbunden.

5.2.2 Trennung von linearem und nichtlinearem Signalanteil

Im vorangegangenen Abschnitt 5.2.1 konnte gezeigt werden, dass die Nutzung medizinischer Mikrobläschen (MB) als nichtlineare Streupartikel in der Zinksuspension möglich ist. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie die Signalanteile bei der zweiten Harmonischen von den Signalanteilen bei der Anregungsfrequenz, also der ersten Harmonischen, getrennt werden können. Die Problemstellung soll anhand des in Abbildung 5.6 dargestellten Schemas verdeutlicht werden. Dazu wird vereinfachend die Amplitude der ersten (f_1) und zweiten (f_2) Harmonischen des Signals für verschiedene Fälle betrachtet. Der erste Fall, gekennzeichnet mit "homogenes Fluid mit MB", entspricht der Untersuchung im vorangegangenen Abschnitt 5.2.1. Ein homogenes Fluid wird mit Mikrobläschen versetzt. Die empfangenen Signale resultieren aus der Reflexion der Schallwelle an den Mikrobläschen, wobei aufgrund der nichtlinearen Interaktion höhere Harmonische entstehen. Der Unterschied in der Amplitude zwischen erster und zweiter Harmonischer ist dabei klein genug, sodass beide im Dynamikbereich des Analog-Digital-Umsetzers (ADU) erfasst werden können und die Amplitude der zweiten Harmonischen ausreichend über dem Rauschen liegt. Für die Messung in der Zinksuspension, gekennzeichnet mit "Zinksuspension mit MB", trifft dies nicht zu. Aufgrund der starken Reflexion der Anregungsschallwelle an den Zinkpartikeln ist die Amplitude der ersten Harmonischen im empfangenen Signal nun wesentlich größer, wobei die Amplitude der zweiten Harmonischen näherungsweise gleich bleibt. Der Dynamikunterschied zwischen erster und zweiter Harmonischer kann somit durch den ADU nicht mehr aufgelöst werden, und die Amplitude der zweiten Harmonischen liegt unterhalb des Rauschens. Eine Signalauswertung der zweiten Harmonischen ist somit nicht möglich. Nachfolgend sollen Ansätze vorgestellt werden, welche es erlauben, die zweite Harmonische dennoch aufzunehmen und auszuwerten.

Zweifrequenz-Phased-Array

Für die Anwendung des HI in der Zinksuspension wird ein Zweifrequenz-Phased-Array verwendet. Dieses besteht aus zwei hintereinander angeordneten Phased Arrays (vgl. 3.2.2). Dabei besitzt das hintere Array (LF-Array) eine Mittenfrequenz von 5 MHz und eine relative Bandbreite von 77 %. Das zweite, vordere Array (HF-Array) weist eine Mittenfrequenz von etwa 15,5 MHz sowie eine relative Bandbreite von 50 % auf. Als Anregungssignal für die Messung wird ein Ultraschallpuls mit $f_1 = 6$ MHz verwendet, welcher mit dem LF-Array ausgesendet wird. Zum Empfangen wird das vordere HF-Array genutzt. Auf diese Weise werden Signalanteile bei der Anregungsfrequenz, also der ersten Harmonischen (f_1) stark gedämpft, da das HF-Array in diesem Frequenzbereich weniger empfindlich ist. Dieser Effekt wird in Abbildung 5.6 verdeutlicht und ist durch "+ Zweifrequenz-Phased-Array" gekennzeichnet. Unter Nutzung des Zweifrequenz-Phased-Arrays kann der Dynamikunterschied zwischen erster und zweiter Harmonischer um etwa 20 ... 30 dB verringert werden.

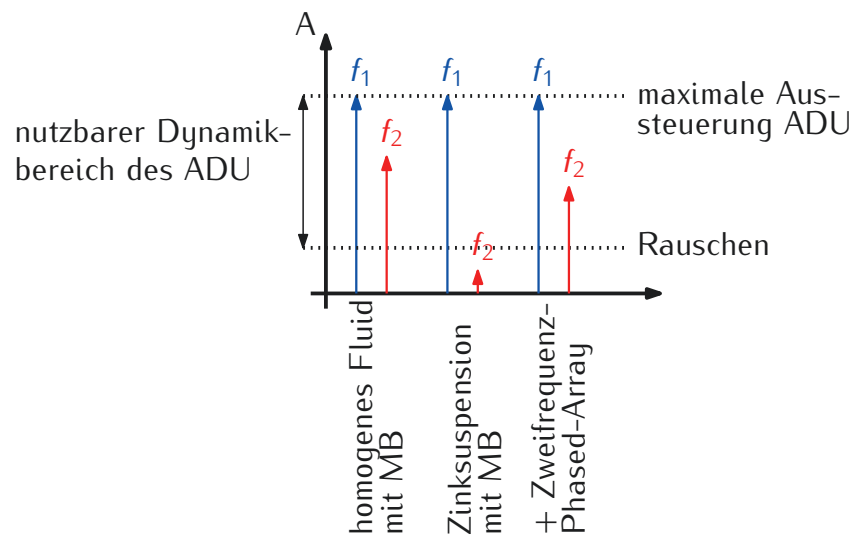


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der Amplituden der ersten und zweiten Harmonischen für verschiedene Fälle: "homogenes Fluid mit MB" steht für die Messung mittels konventionellem Phased Array in einem homogenen Fluid mit Mikrobläschen (MB), "Zinksuspension mit MB" steht für die Messung mittels konventionellem Phased Array in der Zinksuspension mit Mikrobläschen, "+ Zweifrequenz-Phased-Array" steht für die Messung mittels Zweifrequenz-Phased-Array in der Zinksuspension mit Mikrobläschen.

Pulsinversionsverfahren

Die Anwendung des Zweifrequenz-Phased-Arrays ermöglicht eine Filterung der empfangenen Ultraschallsignale vor der Analog-Digital-Umsetzung. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass der Dynamikunterschied zwischen Signalen bei der Anregungsfrequenz und bei der zweiten Harmonischen klein genug ist, so dass es weder zur Übersteuerung des ADU noch zu einem zu geringen Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise ratio) (SNR) der zweiten Harmonischen kommt. Grundsätzlich ist auf diese Weise die Aufnahme der zweiten Harmonischen bereits möglich. Ziel bei der Bildgebung ist es, eine möglichst hohe Ortsauflösung zu erreichen. Daraus folgt, dass die Ultraschallanregung möglichst kurz, also breitbandig, erfolgen muss. Die Folge dieser breitbandigen Anregung ist, dass das Frequenzband des Anregungssignals und das Frequenzband, welches durch die nichtlineare Interaktion entsteht, überlappen. Eine Trennung ist über einen einfachen Bandpassfilter nicht möglich. Dies wird in Abbildung 5.7a verdeutlicht.

Das Pulsinversionsverfahren (PI) [83] erlaubt es, lineare und nichtlineare Signalanteile zu trennen. In kurzer zeitlicher Abfolge werden zwei invertierte Ultraschallpulse ausgesendet und deren Echos aufgezeichnet. Es wird dabei angenommen, dass die Zeit zwischen den Pulsen so kurz ist, dass die Veränderung im Messmedium vernachlässigbar ist. Die Zeitspanne zwischen den Aussendungen wird als Pulsinversionsintervall bezeichnet. Die empfangenen Echosignale der beiden Pulse werden anschließend summiert. Aufgrund der um π verschobenen Phasenlage zwischen den gesendeten Signalen, werden bei der Summierung lineare Signalanteile ausgelöscht. Nichtlineare Signalanteile hingegen überlagern sich konstruktiv und werden somit verstärkt.

Um den Effekt des PI zu verdeutlichen, wurde im gleichen experimentellen Aufbau wie in Abschnitt 5.2.1 eine Messung in der Zinksuspension (Zusammensetzung siehe Abschnitt 3.1.1, Partikelklasse 2) mit 300 μl der Mikrobläschensuspension durchgeführt. In Abbildung 5.7b sind die Amplitudenspektren des empfangenen Signals mit und ohne Anwendung des PI dargestellt. Wird das PI nicht angewendet, so dominiert das Frequenzband um die Anregungsfrequenz ($f_1 = 2 \text{ MHz}$). Signalanteile bei der zweiten Harmonischen ($f_2 = 4 \text{ MHz}$) sind kaum sichtbar und werden von Signalanteilen, welche von der Ultraschallanregung ausgehen, überlagert. Durch die Anwendung des PI werden die linearen Signalanteile bei der Anregungsfrequenz aufgrund von Reflexionen der Anregungsschallwelle an den Zinkpartikeln der Suspension stark gedämpft. Signalanteile, welche aus der nichtlinearen Interaktion mit den Mikrobläschen resultieren, werden hingegen verstärkt. Auf diese Weise ist durch das PI eine Trennung linearer und nichtlinearer Signalanteile möglich, auch wenn sich die Frequenzbänder überlagern. Folglich ist es möglich, hohe Bandbreiten für die Ultraschallanregung zu nutzen und somit hohe Ortsauflösungen zu erzielen.

Signalfilterung

Um das SNR der zweiten Harmonischen zu verbessern, wird vor der Strahlformung eine Bandpassfilterung (Butterworth-Filter vierter Ordnung) durchgeführt. Dabei wer-

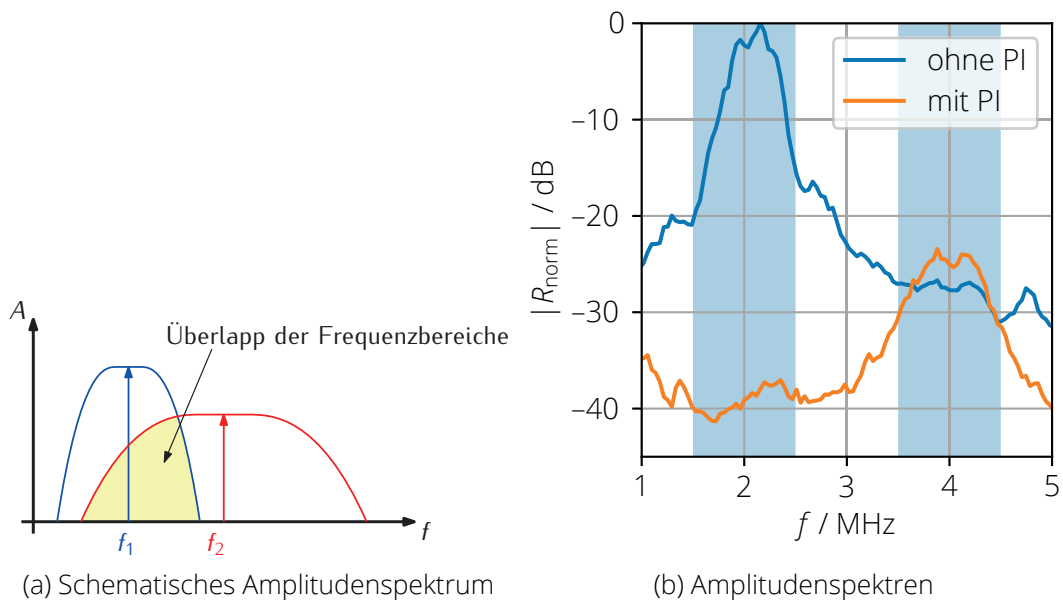


Abbildung 5.7: (a) Vereinfachte, schematische Darstellung des Amplitudenspektrums des empfangenen Ultraschallsignals. Bei breitbandiger Anregung durch f_1 tritt eine starke Überlappung (gelber Bereich, gekennzeichnet durch "Überlapp der Frequenzbereiche") der Frequenzbänder um die Anregungsfrequenz f_1 und um die zweite Harmonische f_2 auf. (b) Amplitudenspektrum des empfangenen Signals mit und ohne Anwendung des PI. Die Spektren wurden auf die maximale Signalamplitude normiert. Der Messaufbau entspricht der Beschreibung in Abschnitt 5.2.1. Es wurden etwa 100 ml der Zinksuspension mit 300 μl der Mikrobläschensuspension versetzt. Es erfolgten 2000 Ultraschallaussendungen ($f_1 = 2 \text{ MHz}$, 4 Signalperioden), wobei jeder zweite Impuls invertiert war. Für die Auswertung ohne PI wurde nur jeder zweite Impuls ausgewertet. Für die dargestellten Spektren wurde eine Mittlung der Spektren der einzelnen empfangenen Signale durchgeführt.

den die Grenzfrequenzen relativ zur Anregungsfrequenz als $[f_u; f_o] = [1, 7; 2, 8] \cdot f_1$ festgelegt.

Im Ergebnis dieses Unterabschnittes ist es also gelungen, die aufgrund der nichtlinearen Interaktion mit den Mikrobläschen entstandenen Signalanteile, von denen der Anregungsschallwelle und den resultierenden Reflexionen an den Zinkpartikeln zu trennen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für die Abbildung der nichtlinearen Partikel.

5.2.3 Strahlformung mit Kompensation der Streuung

Im vorangegangenen Abschnitt konnte gezeigt werden, dass eine Selektion der nichtlinearen Signalanteile, welche von den Mikrobläschen ausgehen, möglich ist. Bei der Propagation der Ultraschallwelle bei der zweiten Harmonischen von den Mikrobläschen zu den Ultraschallwandlerelementen kommt es aufgrund der Zinkpartikel zur Streuung und zu einer starken Verzerrung der Wellenfront. Bei der Bildgebung führt dies zu einem Speckle-Muster, welches eine Lokalisierung isolierter Partikel verhindert.

Um die Wellenfrontverzerrungen zu kompensieren soll ein neuartiger Strahlformer, der Double-Stage Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer (DS-DMAS) [84], eingesetzt werden. Im Gegensatz zum konventionellen Delay-and-Sum-Strahlformer (DAS) wichtet dieser die empfangenen Signale nach ihrer örtlichen Kohärenz. Auf diese Weise werden Signalanteile, welche aus einer Reflexion der Schallwelle an den Zinkpartikeln resultieren, unterdrückt und es kommt zu einer stark reduzierten Ausbildung des Speckle-Musters. In diesem Abschnitt soll dieser Strahlformer vorgestellt und seine Funktion anhand einer Simulation demonstriert werden.

Zunächst wird eine Vorstufe des DS-DMAS betrachtet: der Delay-Multiply-and-Sum-Strahlformer (DMAS) [85]. In Abbildung 5.8 ist das Blockschaltbild des DMAS exemplarisch für eine Apertur mit drei Ultraschallelementen dargestellt. Die aufgenommenen Ultraschallsignale r_1 , r_2 und r_3 werden zunächst wie beim DAS verzögert. Die Verzögerungszeiten τ_1 , τ_2 und τ_3 werden entsprechend der Laufzeit der Schallwelle zum gewählten Fokuspunkt berechnet, siehe Abschnitt 2.2.1. Anschließend werden die verzögerten Signale paarweise miteinander multipliziert. Dies entspricht der Berechnung der Korrelation zwischen diesen Kanälen. Auf diese Weise werden Signalanteile, welche kohärent über die gesamte Apertur des Ultraschallwandlers sind, verstärkt. Dies trifft nur auf die Signalanteile zu, welche den gleichen örtlichen Ursprung haben. Reflexionen der Schallwelle an den Partikeln werden somit unterdrückt. Nach der Multiplikation wird die vorzeichenbehaftete Wurzel der Signale gebildet und diese anschließend addiert. Da bei der Multiplikation der Signale ein Gleichanteil entsteht, wird abschließend eine Bandpassfilterung durchgeführt. Im Ergebnis erhält man das Signal r_{DMAS} für den gewählten Fokuspunkt.

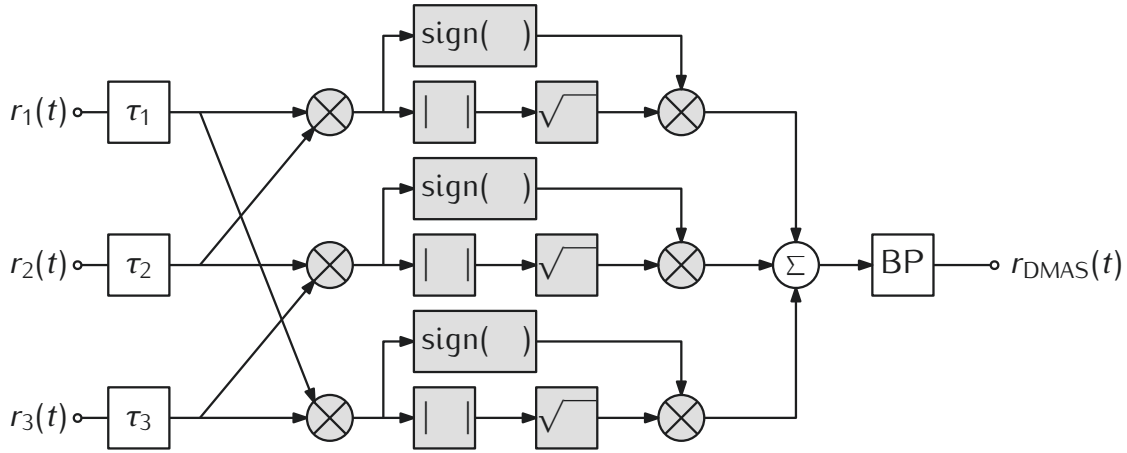


Abbildung 5.8: Blockdiagramm des DMAS.

Mathematisch lässt sich dieser Prozess wie folgt beschreiben [85]:

$$r_{ij}(t) = \text{sgn}(r_i(t - \tau_i)r_j(t - \tau_j)) \cdot \sqrt{|r_i(t - \tau_i)r_j(t - \tau_j)|} \quad (5.1)$$

$$r_{\text{DMAS}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{el}}-1} \sum_{j=i+1}^{N_{\text{el}}} r_{ij}(t). \quad (5.2)$$

Dabei stellt $r_i(t - \tau_i)$ das um die Zeitverzögerung τ_i verschobene Signal des Ultraschallwandlerelements mit dem Index i und N_{el} die Anzahl der Ultraschallwandlerelemente dar. Durch den DS-DMAS wird das Konzept des DMAS erweitert. Die Summierung in der Berechnung des DMAS kann als DAS innerhalb des DMAS verstanden werden. Dies soll anhand folgender Umformung verdeutlicht werden:

$$r_{\text{DMAS}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{el}}-1} \sum_{j=i+1}^{N_{\text{el}}} r_{ij}(t) \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned}
&= \underbrace{(r_{1,2} + r_{1,3} + \dots + r_{1,N_{\text{el}}})}_{\text{Summand 1}} \\
&\quad + \underbrace{(r_{2,3} + r_{2,4} + \dots + r_{2,N_{\text{el}}})}_{\text{Summand 2}} \\
&\quad + \dots \\
&\quad + \underbrace{(r_{N_{\text{el}}-1,N_{\text{el}}})}_{\text{Summand } N_{\text{el}} - 1}
\end{aligned} \quad (5.4)$$

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Abhängigkeit von der Zeit t nicht mit notiert. Die einzelnen Summanden können als:

$$r'_i = \sum_{j=i+1}^{N_{\text{el}}} r_{ij}. \quad (5.5)$$

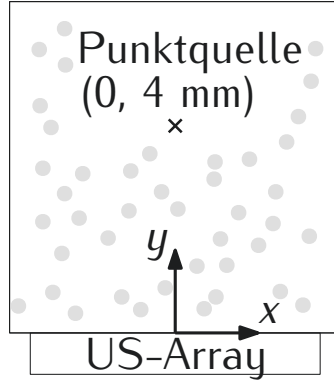


Abbildung 5.9: Simulationsanordnung für den Vergleich des DAS und des DS-DMAS. Als Ultraschallwandler (US-Array) wird das HF-Array des Vermon-Zweifrequenz-Arrays genutzt, siehe 3.2.2. Parameter für die Simulation: Elastodynamische Finite Integrationstechnik [69], Ultraschallanregungsfrequenz $f = 12$ MHz, 2 Signalperioden.

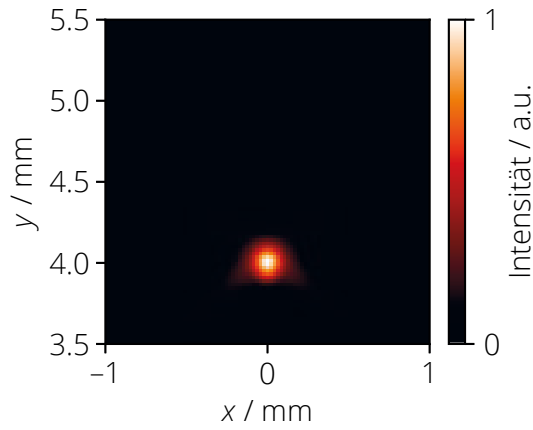
ausgedrückt werden. Die Summierung innerhalb des DMAS soll nun wiederum durch eine Multiplikation der Signale ersetzt werden [84]. Daraus ergibt sich die Bildungsvorschrift für den DS-DMAS:

$$r_{\text{DS-DMAS}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{el}}-2} \sum_{l=k+1}^{N_{\text{el}}-1} r'_k \cdot r'_l. \quad (5.6)$$

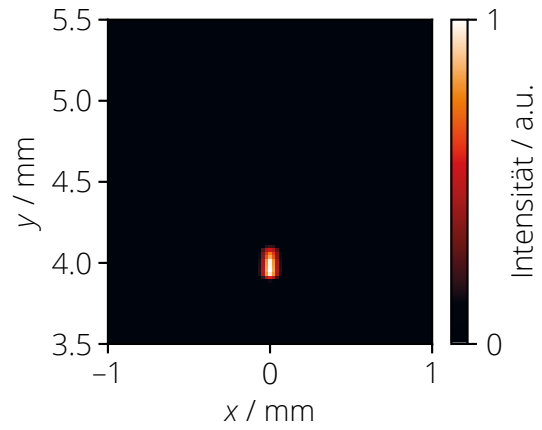
Aufgrund der kombinatorischen multiplikativen Verknüpfung der Signale steigt der Rechenaufwand für den DS-DMAS im Vergleich zum DAS von $\mathcal{O}(N_{\text{el}})$ auf $\mathcal{O}(N_{\text{el}}^2)$ an. Für $N_{\text{el}} = 96$ Ultraschallelemente entspricht dies einem Anstieg der Rechenzeit um den Faktor 96. Für die Untersuchung der Strömung in der ZLFB ist dies allerdings unkritisch, da keine Anforderung an die Echtzeitfähigkeit besteht.

Anhand einer numerischen Simulation der Schallausbreitung in der Zinksuspension soll die Wirkung des DS-DMAS im Vergleich zum DAS demonstriert werden. Die experimentelle Anordnung für die Simulation ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Eine Punktquelle wird in einem Abstand von 4 mm vor dem Ultraschall-Array in der Zinksuspension positioniert. Als Ultraschallwandler wird das HF-Array des Vermon-Zweifrequenz-Array genutzt. Durch die Punktquelle wird ein Ultraschallpuls mit einer Mittenfrequenz von $f = 12$ MHz und zwei Perioden ausgesandt. Die Ultraschallwelle propagiert durch die Zinksuspension und wird durch den Ultraschallwandler aufgezeichnet. Anschließend erfolgt die Strahlformung unter Nutzung des DS-DMAS. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Zum Vergleich ist zusätzlich das Ergebnis für den DAS, sowie das Ergebnis für die Zinksuspension ohne Partikel (homogenes Fluid ohne Streuung) dargestellt.

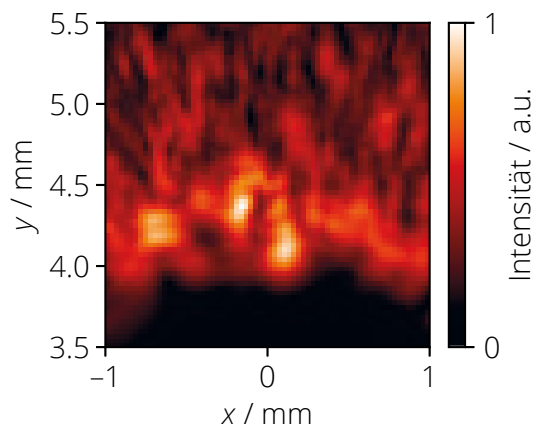
Bereits bei der Bildgebung in der Zinksuspension ohne Partikel, also einem homogenen Fluid, ist eine Verbesserung der Bildqualität bei Nutzung des DS-DMAS feststell-



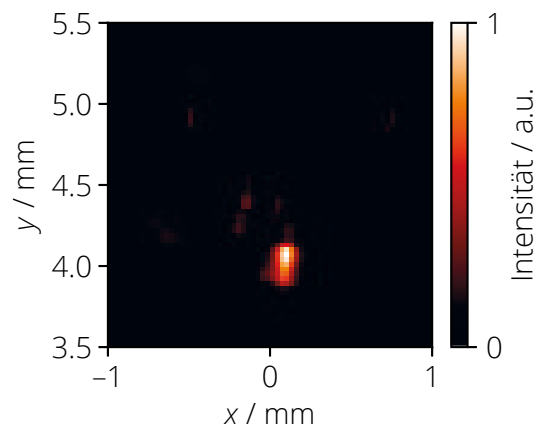
(a) DAS, Zinksuspension ohne Partikel.



(b) DS-DMAS, Zinksuspension ohne Partikel



(c) DAS, Zinksuspension



(d) DS-DMAS, Zinksuspension

Abbildung 5.10: Vergleich der Abbildung einer Punktschallquelle für den DAS und den DS-DMAS. (a, b) Zinksuspension ohne Zinkpartikel, (c, d) Zinksuspension

bar. Der Fokuspunkt wird in y -Richtung etwa um den Faktor zwei kleiner. Die Ortsauflösung wird demnach also verdoppelt. Für die Bildgebung in der Zinksuspension mit Partikeln ist erkennbar, dass die Anwendung des DAS zu einer starken Ausprägung eines Speckle-Muster führt. Die Punktquelle kann in diesem Fall nicht mehr eindeutig lokalisiert werden. Im Gegensatz dazu kann bei der Nutzung des DS-DMAS das Speckle-Muster stark unterdrückt und die Punktquelle eindeutig abgebildet werden. Verglichen mit der Abbildung der Punktquelle für die Zinksuspension ohne Partikel (homogenes Fluid), sind die Bildgebungseigenschaften allerdings schlechter. Der Einfluss der Zinkpartikel auf die Messunsicherheit bei der Geschwindigkeitsmessung und die Ortsauflösung wird in Abschnitt 4.3 untersucht.

Im Ergebnis dieses Unterabschnittes kann festgestellt werden, dass durch die Nutzung des DS-DMAS eine Kompensation der Wellenfrontverzerrungen aufgrund der Zinkpartikel gelingt. Dadurch ist es möglich, die nichtlinearen Streupartikel (Mikrobläschen) isoliert abzubilden. Dies wiederum ermöglicht die Lokalisierung einzelner Partikel und deren Verfolgung zur Geschwindigkeitsschätzung.

5.2.4 Particle Tracking

In den vorangegangenen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass eine Abbildung nichtlinearer Streupartikel (Mikrobläschen) in der Zinksuspension möglich ist. In diesem Unterabschnitt wird vorgestellt, wie die Partikel lokalisiert und anschließend verfolgt werden. Abschließend wird dargelegt, wie aus den ermittelten Trajektorien das Geschwindigkeitsprofil der Zinksuspension in der betriebenen ZLFB bestimmt wird.

Für das Particle Tracking wird das Python-Paket trackpy [86] verwendet, welches auf dem von Crocker et al. [87] beschriebenen Verfahren zur Partikellokalisierung beruht. Nach der Anwendung eines Gauß-Filters zur Rauschunterdrückung werden zunächst Helligkeitsmaxima im Bild bestimmt. Anschließend wird die Position des Partikels durch die Bestimmung des Schwerpunktes der Helligkeitsverteilung bestimmt. Dadurch kann die Unsicherheit der Positionsbestimmung auf ein Zehntel Pixel reduziert werden. Über die Vorgabe eines mittleren Durchmessers des Partikelbildes kann der in die Schwerpunktberechnung einbezogene Bereich festgelegt und Fehlerkennungen reduziert werden. Für jedes aufgenommene Ultraschallbild erfolgt die Lokalisierung der darin befindlichen Partikel. Dabei werden wesentliche Parameter, wie die Größe des Partikels, die Exzentrizität zusätzlich zur Partikelposition abgespeichert. Diese können zur Reduktion von fehlerhaft erkannten Partikeln genutzt werden.

An die Lokalisierung schließt die Verfolgung der Partikel an. Dabei werden in einem definierten Radius Partikel in aufeinander folgenden Bildern gesucht. Ergebnis der Partikelverfolgung ist eine Liste mit Trajektorien. Jede Trajektorie besteht wiederum aus einer Liste von Zeitpunkten und zugeordneten Partikelpositionen für genau ein Partikel. Entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 2.3.3 erfolgt die Berechnung der Geschwindigkeit für jeden Zeitschritt entlang der Trajektorie und man erhält die Geschwindigkeit $\mathbf{v}_i(t) = (v_{x,i}, v_{y,i})^T$ des Partikels bzw. der Trajektorie i .

Abweichend von der Beschreibung in Abschnitt 2.3.3 kann die Betrachtung für die

Messung in der ZLFB vereinfacht werden. Aufgrund der hohen Viskosität der Zinksuspension sowie der Messanordnung können folgende Annahmen getroffen werden (Koordinatensystem entsprechend Abbildung 5.2):

1. $v_y \stackrel{!}{=} 0, v_z \stackrel{!}{=} 0$
2. $\frac{\partial v_x}{\partial x} \stackrel{!}{=} 0, \frac{\partial v_x(t)}{\partial t} \stackrel{!}{=} 0$ (laminare, stationäre Strömung)
3. $\frac{\partial v_x}{\partial z}$ ist im Messbereich vernachlässigbar

Aufgrund der ersten Annahme wird im Folgenden nur noch die Geschwindigkeit in x-Richtung v_x betrachtet. Diese weist im Messbereich lediglich eine Abhängigkeit von der y-Position auf. Da die Strömung außerdem keine Zeitabhängigkeit aufweist, wird die Abhängigkeit von der Zeit t im Folgenden vernachlässigt. Zur Kennzeichnung der Partikelpositionen entlang einer Trajektorie wird stattdessen der Index j verwendet. Die Trajektorie mit dem Index i kann somit als x_{ij} geschrieben werden, wobei gilt $i = 1 \dots N_{\text{traj}}$ und $j = 1 \dots M_i$ mit der Anzahl der Trajektorien N_{traj} und der Anzahl der Partikelpositionen entlang der Trajektorie M_i . Aus einer Trajektorie wird die Geschwindigkeit $v_{x,i}(y_j)$ wie folgt berechnet:

$$v_{x,i}(y_j) = \frac{x_{i,M_i} - x_{i,0}}{(M_i - 1)\Delta t}, \quad (5.7)$$

wobei $\Delta t = f_{\text{prf}}^{-1}$ gilt. Durch $v_{x,i}(y_j)$ wird für jede Trajektorie i ein Geschwindigkeitswert $v_{x,i}$ zu einer diskreten Position y_j angegeben. Zur Angabe eines Strömungsprofils wird die y-Koordinate quantisiert. Der Abstand der Quantisierungsstufen entspricht dabei δ_y . Zur Bestimmung eines Geschwindigkeitswertes in einem Quantisierungsintervall $\left[j\delta_y - \frac{\delta_y}{2}; j\delta_y + \frac{\delta_y}{2}\right]$, wird der Mittelwert aus allen Geschwindigkeitswerten $v_{x,i}$ in diesem Intervall gebildet. Im Ergebnis erhält man das Geschwindigkeitsprofil $v_x(y)$.

In diesem Abschnitt wurde die SRPTV zur hochauflösten Strömungsmessung in einer betriebenen ZLFB vorgestellt. Das eingesetzte Messverfahren beruht auf der Anwendung des HI, eines neuartigen Strahlformers, welcher die Kohärenz der Ultraschallwelle wichtet, sowie dem Particle Tracking. Bei der Charakterisierung der Mikrobläschen konnte erstmals gezeigt werden, dass medizinische Mikrobläschen als nichtlineare Streupartikel für den Einsatz in der stark basischen Zinksuspension geeignet sind. Die SRPTV erlaubt prinzipiell die Erfassung eines Geschwindigkeitsfeldes oder -profils mit einer Auflösung jenseits des Beugungslimits. Welche Ortsauflösung tatsächlich erreicht wird, soll im folgenden Abschnitt untersucht werden.

5.3 Charakterisierung der Messeigenschaften

In diesem Abschnitt wird die Charakterisierung der SRPTV hinsichtlich der Geschwindigkeitsunsicherheit und der Ortsauflösung vorgestellt. In Unterabschnitt 5.3.1 wird zunächst die Vorgehensweise für die Charakterisierung vorgestellt. Anschließend erfolgt

die Untersuchung der Positionsunsicherheit bei der Partikellokalisierung. In Abschnitt 5.3.3 wird abschließend gezeigt, wie die Geschwindigkeitsunsicherheit aus der Positionsunsicherheit bestimmt wird. Im Folgenden wird die Positionsmessunsicherheit auf die Wellenlänge λ der ausgesendeten Ultraschallwelle ($f = 6 \text{ MHz}$) von $\lambda = 330 \text{ }\mu\text{m}$ bezogen.

5.3.1 Vorgehen zur Charakterisierung der Messeigenschaften

Ziel dieses Kapitels ist einerseits die Bestimmung der bei der Messung auftretenden Ortsauflösung, welche im Allgemeinen als Positionsunsicherheit σ_x :

$$\sigma_x = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)^T, \quad (5.8)$$

mit den Komponenten σ_x , σ_y und σ_z in x -, y - und z -Richtung ausgedrückt werden kann. Weiterhin soll die Geschwindigkeitsunsicherheit σ_v :

$$\sigma_v = (\sigma_{v_x}, \sigma_{v_y}, \sigma_{v_z})^T, \quad (5.9)$$

mit den Komponenten σ_{v_x} , σ_{v_y} und σ_{v_z} in x -, y - und z -Richtung bestimmt werden. Wie in Unterabschnitt 5.2.4 dargestellt, tritt bei der Messung in der betriebenen ZLFB nur eine Geschwindigkeitskomponente in x -Richtung auf. Daher wird nachfolgend auch nur die Messunsicherheit der x -Komponente σ_{v_x} betrachtet. Diese wird durch zwei wesentliche Unsicherheitsursachen bestimmt:

- Die Geschwindigkeitskomponente v_x wird nach Gleichung 5.7 bestimmt. In die Berechnung der Geschwindigkeit gehen die Unsicherheit der Zeit σ_t sowie die Unsicherheit der Positionsbestimmung in x -Richtung σ_x ein. Die Standardunsicherheit der Zeit σ_t wurde für das verwendete Messsystem mit $0,94 \text{ ns}$ bestimmt. Für die in dieser Arbeit betrachteten Strömungen im Bereich bis 100 mm s^{-1} bei einer Abtastfrequenz von maximal 4 kHz ist dieser Unsicherheitsbeitrag vernachlässigbar. Der erste Messunsicherheitsbeitrag kann also ausschließlich aus der Unsicherheit der Position σ_x bestimmt werden.
- Der zweite Unsicherheitsbeitrag entsteht aufgrund der begrenzten Ortsauflösung des Messsystems. Das Strömungsfeld in der ZLFB weist einen Geschwindigkeitsgradienten $\frac{\partial v_x}{\partial y} \neq 0$ auf. Die begrenzte Ortsauflösung in y -Richtung führt zu einer Unsicherheit der gemessenen Geschwindigkeit v_x . Im Folgenden wird die Positionsunsicherheit σ_y als Ortsauflösung für die Messung an der ZLFB betrachtet.

Für die Geschwindigkeitsunsicherheit σ_{v_x} kann also festgestellt werden, dass diese aus den Positionsunsicherheiten σ_x und σ_y bestimmt wird.

Für die in dieser Arbeit betrachteten Messungen ist ausschließlich die Ortsauflösung in y -Richtung relevant, welche durch die Positionsunsicherheit σ_y bestimmt werden kann. Hinsichtlich der Ortsauflösung in x -Richtung besteht keine Anforderung bezüglich der

Messung in der ZLFB, da $\frac{\partial v_x}{\partial x} \stackrel{!}{=} 0$. Die Ortsauflösung in z-Richtung wird nicht betrachtet, da die Variation des Strömungsfeldes im Messbereich in dieser Richtung aufgrund des Aspektverhältnisses des Strömungskanals von 30 mm:2,6 mm vernachlässigbar ist.

Zusammenfassend ist das Ziel dieses Abschnittes also die Bestimmung der Positionsunsicherheiten σ_x mit einer x- und y-Komponente:

$$\sigma_x = (\sigma_x, \sigma_y)^\top, \quad (5.10)$$

um daraus die Ortsauflösung des Messverfahrens und die Geschwindigkeitsunsicherheit abzuleiten.

5.3.2 Untersuchung der Positionsunsicherheit

Die Positionsunsicherheit σ_x setzt sich aus einem zufälligen $\sigma_{x,zuf}$ und einem unbekannt systematischen Anteil $\sigma_{x,sys}$ zusammen:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{x,zuf}^2 + \sigma_{x,sys}^2}. \quad (5.11)$$

Um die Positionsunsicherheit zu untersuchen, kann eine Kalibriermessung genutzt werden, für welche ein Positionsnormale notwendig ist. Für das vorgestellte Messverfahren müsste ein Mikrobläschen an einer bekannten Position platziert werden. Dies ist aufgrund der Größe und der Instabilität der Mikrobläschen nicht möglich. Es wird daher ein anderes Vorgehen zur schrittweisen Charakterisierung der Positionsunsicherheit verfolgt. Zunächst werden die systematische Positionsunsicherheit $\sigma_{x,sys,1}$ und die zufällige Positionsunsicherheit $\sigma_{x,zuf,1}$ für die Zinksuspension ohne Partikel (homogenes Fluid) anhand eines Positionsnormals bestimmt. Da die Nutzung des HI ohne Mikrobläschen nicht möglich ist, wird an dieser Stelle auf einen linearen Streukörper zurückgegriffen. Der Einfluss der Zinkpartikel auf die Positionsunsicherheit wird anschließend separat untersucht. Dazu wird eine numerische Simulation verwendet. Die Streuung an den Zinkpartikeln führt zu einer zufälligen Positionsunsicherheit $\sigma_{x,zuf,2}$. Aus den einzelnen Unsicherheitsbeiträgen kann abschließend die Gesamtunsicherheit bestimmt werden. In Tabelle 5.2 sind die auftretenden Unsicherheiten und deren Ursachen zusammengefasst.

Positionsnormale

Für die Kalibriermessungen wird ein Positionsnormale verwendet. Die experimentelle Anordnung ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Die Zinksuspension ohne Zinkpartikel wird in ein Gefäß aus PMMA gegeben. Die Wand durch welche der Ultraschall in das Fluid eingekoppelt wird, ist aus ABS gefertigt und besitzt eine Dicke von 5 mm. Dies entspricht der Anordnung für die Messung in der ZLFB. Die nichtlinearen Streukörper (Mikrobläschen) werden durch einen festen Streukörper in Form eines Drahtes mit einer Dicke von 50 μm nachgebildet. Damit ist der Streukörperdurchmesser um den

Tabelle 5.2: Beiträge zur Positionsunsicherheit bei der Lokalisierung eines Streupartikels und deren Ursachen.

Typ	Ursache	Bestimmung
systematisch, $\sigma_{x,sys,1}$	Unbekannte systematische Abweichung zwischen experimenteller Anordnung und ihrer Modellierung für die Strahlformung für folgende Eingangsgrößen: Schallgeschwindigkeiten, Positionen und Laufzeitunterschiede der Wandlerelemente, Wanddicke, Dicke der Ultraschallkoppelschicht	Vergleich mit Positionsnormal
zufällig, $\sigma_{x,zuf,1}$	Rauschprozesse (thermisches Rauschen, Schrotrauschen)	Vergleich mit Positionsnormal
zufällig, $\sigma_{x,zuf,2}$	Streuung an Zinkpartikeln, Verzerrung der Wellenfront	numerische Simulation

Faktor drei kleiner als die genutzte Ultraschallwellenlänge ($\lambda = 166 \mu\text{m}$ bei $f = 12 \text{ MHz}$) und kann somit in als Punktquelle angenähert werden. Der Streukörper ist über eine Halterung an zwei Verfahrtischen befestigt. Diese erlauben eine Positionierung in der x-y-Ebene. Die Verfahrtische weisen eine Positionsunsicherheit von maximal $25 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ auf. Der Messbereich für die Kalibriermessung weist eine maximale Ausdehnung von 8 mm auf. Daraus ergibt sich eine Positionsunsicherheit der Verfahrtische und damit der Position des Positionsnormals von maximal $2,5 \mu\text{m}$ innerhalb der Messregion. Um eine Übereinstimmung der Koordinatensysteme der Streukörperpositionierung und der Ultraschallbildgebung zu erreichen, wird das Erstgenannte translatiert so dass die mittlere absolute Positionsabweichung über die gesamte Messregion minimal wird. Als Ultraschallwandler wird das HF-Array des Vermon-Zweifrequenz-Arrays verwendet. Die für die Messung verwendeten Messsystemparameter sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Es wird eine Mittenfrequenz von 12 MHz verwendet. Dies entspricht in der tatsächlichen Messung an der ZLFB der Mittenfrequenz der zweiten Harmonischen bzw. der doppelten Anregungsfrequenz. Auf diese Weise wird eine Vergleichbarkeit der mit dem linearen Streukörper (Aussendung mit 12 MHz , Empfang mit 12 MHz) ermittelten Messunsicherheit zur tatsächlichen Messung unter Nutzung des HI (Aussendung mit 6 MHz , Empfang mit 12 MHz) hergestellt. Die Angabe der Positionsunsicherheit ist auf die Wellenlänge der Anregung ($f = 6 \text{ MHz}$) normiert.

Tabelle 5.3: Parameter für die Messung am Positionsnorm.

Parameter	Wert
Fluid	Elektrolyt (Zinksuspension ohne Partikel)
Messung	
Anregungssignal	Ultraschallmittenfrequenz $f = 12$ MHz, 2 Perioden, Rechteckimpuls
Ultraschallwandler	Vernon-Zweifrequenz-Array (vgl. 3.2.2), 96 Wandlerelemente sende- und empfangsseitig (HF-Array) genutzt
Pulswiederholrate f_{prf}	10 Hz
Anzahl der aufgenommenen Bilder pro Position	20
Bildgebung	
Clutter-Filter	ja, Messung ohne Streukörper wird vom empfangenen Signal abgezogen
Größe eines Gates	1λ (bezogen auf $\lambda = 12$ MHz)
Anzahl der Gates pro Wellenlänge (bezogen auf $\lambda = 12$ MHz)	4
Strahlformer	DS-DMAS
Untere und obere Grenzfrequenz des verwendeten Bandpassfilters	10,2 MHz, 16,8 MHz
Partikellokalisierung	
Geschätzter Durchmesser des Streukörperbildes	375 μm

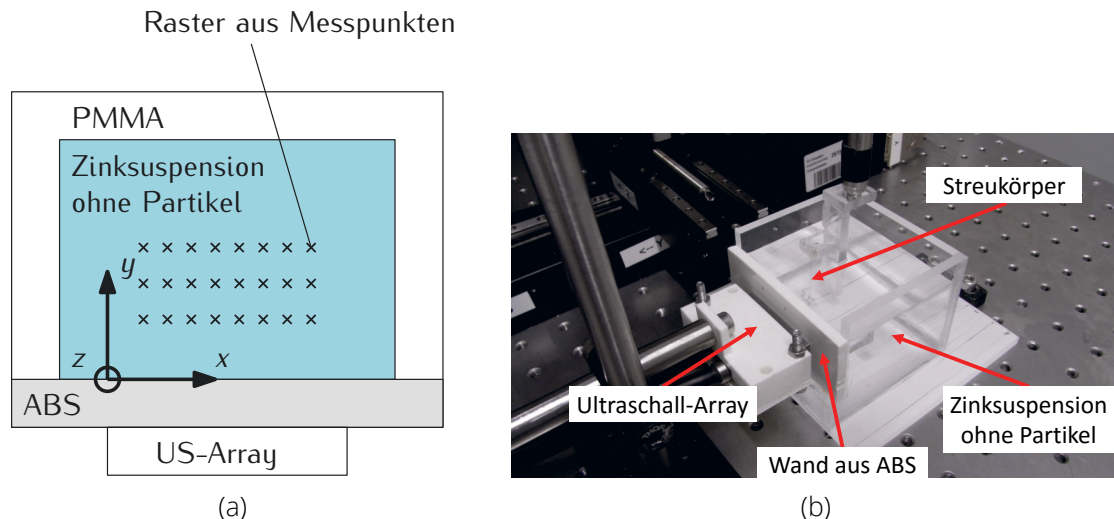


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung (a) und Bild (b) der experimentellen Anordnung zur Erzeugung des Positionsnormals

Positionsunsicherheit aufgrund systematischer Messabweichung $\sigma_{x,sys,1}$

Für die Untersuchung der systematischen Positionsunsicherheit $\sigma_{x,sys,1}$ wird das Positionsnormal sowie die in Tabelle 5.3 gelisteten Parameter verwendet. In einem Messfeld von $8 \times 3 \text{ mm}^2$ (Koordinatensystem wie in Abbildung 5.11a dargestellt) wurde eine Matrix von 9×7 Punkten aufgespannt. Der Streukörper wurde an jede Position bewegt und jeweils 20 Ultraschallaussendungen vorgenommen. Die empfangenen Signale wurden gemittelt und anschließend das Ultraschallbild berechnet und die Position des Streukörpers bestimmt. In Abbildung 5.12 sind die Position des Positionsnormals (gekennzeichnet als Referenz) sowie die gemessene Position für alle Messpunkte gegenübergestellt. Die Differenz zwischen Messung und Normal für die x- und y-Komponente ist in Abbildung 5.13 zu sehen. Die Positionsabweichung in x-Richtung ist in der Mitte des Messbereiches minimal und steigt zu beiden Seiten etwa symmetrisch an. Ursache für die Abweichung ist eine unzureichende Modellierung der Messanordnung. Für die Berechnung der Zeitverzögerung (delay rules), welche für die Ultraschallbildgebung (vgl. Abschnitt 2.2.1) genutzt werden, ist die genaue Kenntnis der Wanddicke, sowie der Schallgeschwindigkeit der Wand und des Fluides erforderlich. Des Weiteren muss die Position der Ultraschallelemente bekannt sein. Sowohl Schallgeschwindigkeiten und Wanddicken als auch die Position der Ultraschallelemente weisen unbekannte systematische Messabweichungen auf. Dies ist besonders kritisch, wenn es aufgrund der Schallgeschwindigkeitsunterschiede zu Brechung am Übergang von Wand zu Fluid kommt. Für einen Messpunkt in der Mitte der Messregion ergibt sich für die äußeren Ultraschallelemente die größte Zeitverzögerung beim Fokussieren. Je weiter die Messpunkte von der Mitte der Messregion in x-Richtung entfernt sind, desto größer werden die angewendeten Zeitverzögerungen für die am weitesten entfernten

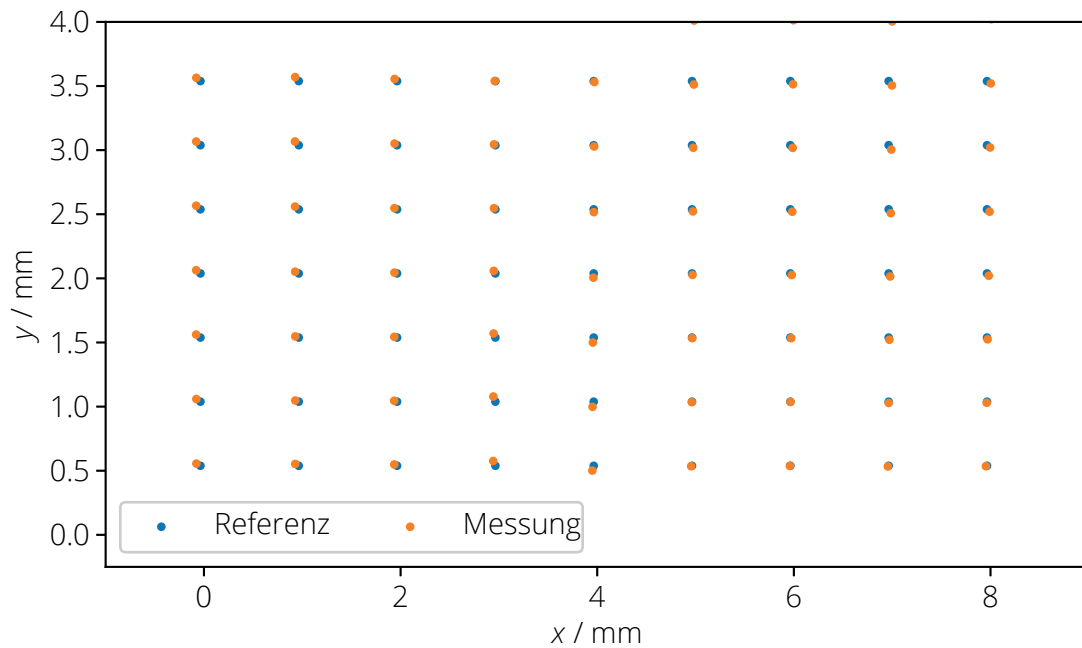


Abbildung 5.12: Darstellung der aus den Ultraschallbildern ermittelten Positionen (Messung) und der tatsächlichen Position (Referenz) des Streukörpers.

Ultraschallelemente. Eine Unsicherheit in der Modellierung bei der Berechnung der Zeitverzögerung macht sich dann entsprechend stärker bemerkbar. Für die Positionsabweichung in y -Richtung tritt die maximale Abweichung in der Mitte des Messbereiches auf. Ursache ist hier ebenfalls die unzureichende Modellierung der Messumgebung. Zusätzlich können Reflexionen bei der wandnahen Messung Ursache für eine systematische Positionsabweichung sein. Nach dem Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [71] kann die Positionsunsicherheit $\sigma_{x,sys,1}$ aus den maximalen systematischen Messabweichungen $\Delta\hat{x}$ und $\Delta\hat{y}$ im Messbereich abgeschätzt werden:

$$\frac{\sigma_{x,sys,1}}{\lambda} = \begin{pmatrix} \Delta\hat{x} \\ \Delta\hat{y} \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\lambda\sqrt{3}} = \begin{pmatrix} 0,132 \\ 0,127 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \begin{pmatrix} 0,077 \\ 0,073 \end{pmatrix}. \quad (5.12)$$

Zufällige Positionsunsicherheit aufgrund von Rauschen $\sigma_{x,zuf,1}$

Das aufgenommene Ultraschallsignal ist mit Rauschen überlagert, welches vorwiegend aus thermischen Rauschen und Schrotrauschen aufgrund der Elektronikkomponenten des Phased Array Ultrasound Doppler Velocimeter (PAUDV) (Verstärker, Frequenzfiltern etc.) besteht. In diesem Abschnitt soll der Einfluss des Rauschens auf die Positionsunsicherheit der abgebildeten Partikel untersucht werden. Dazu wird ebenfalls das Positionsnormal verwendet. Im Gegensatz zum vorangegangenen Abschnitt wird

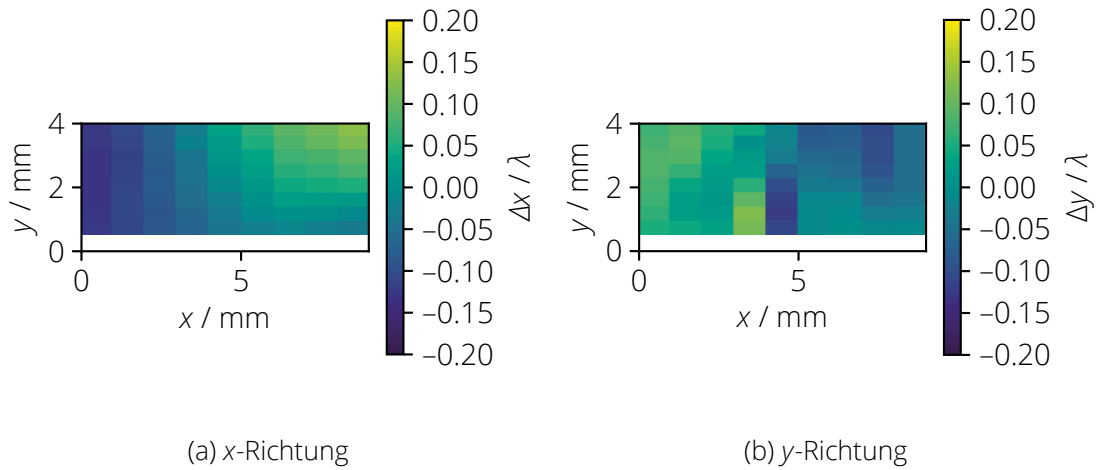


Abbildung 5.13: Systematische Abweichung der x- und y-Position zwischen Messung und Referenz.

allerdings nur eine Messposition betrachtet, welche willkürlich festgelegt wird, da das Rauschen nicht von der Streukörperposition in der Messregion abhängig ist. Der Streukörper wird mit maximalem Abstand zum Ultraschall-Array in der Mitte des Messfeldes positioniert. Über die Intensität des Anregungssignals wird das SNR variiert. Die übrigen Messsystemparameter wurden konstant gehalten. Für jedes SNR wurden 100 Messungen durchgeführt und anschließend die empirischen Standardabweichungen s_x und s_y der Streukörperposition in x- und y-Richtung bestimmt. Diese wird als Standardunsicherheit der Positionsbestimmung $\sigma_{x,zuf,1}$ aufgrund des Rauschens interpretiert. In Abbildung 5.14 ist das Ergebnis der Messung dargestellt. Im Bereich $SNR > 4$ dB ist der Einfluss des Rauschens auf die Positionsunsicherheit gering, steigt allerdings für $SNR < 4$ dB stark an. In Vorversuchen wurde das HI mit den Mikrobläschen an der Zinksuspension angewendet und ein minimales SNR von 4,2 dB festgestellt. Entsprechend kann der Beitrag zur Positionsunsicherheit aufgrund des Rauschens wie folgt abgeschätzt werden:

$$\frac{\sigma_{x,zuf,1}}{\lambda} = \begin{pmatrix} 0,02 \\ 0,024 \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

Zufällige Positionsunsicherheit aufgrund der Streuung an den Zinkpartikeln

$\sigma_{x,zuf,2}$

Um den Einfluss der Zinkpartikel auf die Messunsicherheit zu quantifizieren, wird eine numerische Simulation der Schallausbreitung in der Zinksuspension durchgeführt. Die verwendete Simulationsanordnung ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Eine Punktquelle wird in der Zinksuspension positioniert. Diese sendet einen Ultraschallpuls aus welcher durch die Suspension und anschließend durch die ABS-Wand zum Ultraschall-

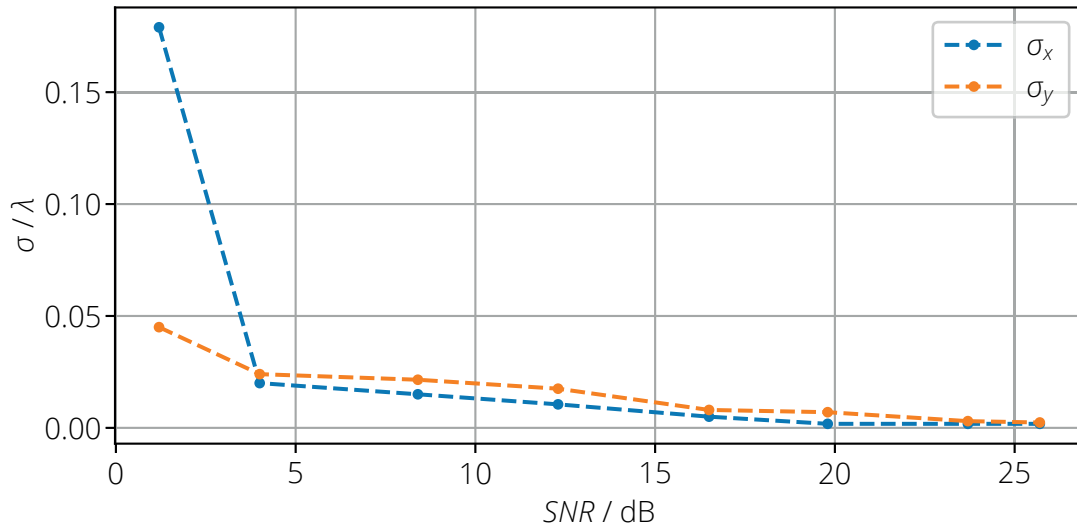


Abbildung 5.14: Unsicherheit der Positionsbestimmung eines Streupartikels in Abhängigkeit des SNR. Die Unsicherheit wurde auf die Wellenlänge λ normiert.

Array propagiert. Die Anordnung entspricht dem Messaufbau für die betriebene ZLFB. Aufgrund der Partikel kommt es zu starker Streuung und somit zur Störung der Wellenfront. Mittels DS-DMAS Strahlformer kann diese teilweise kompensiert werden, so dass isolierte Partikel darstellbar sind. Die konkrete Störung, welche durch die Partikel eingebracht wird, hängt von der Partikelanordnung ab. In Abbildung 5.16 sind die Ultraschallbilder für vier verschiedene Partikelanordnungen dargestellt. Die Abbildung der Punktschallquelle ist deutlich und isoliert zu erkennen. Allerdings schwankt die Position der Abbildung, um die wahre Position. Es kommt also zu einer zufälligen Messabweichung der Position. Um die Messabweichung zu quantifizieren, wurde die Simulation für 100 verschiedene zufällige Partikelanordnungen wiederholt und jeweils die Position der Punktquelle bestimmt. Aus den ermittelten Positionen wurde die empirische Standardabweichung s_x und s_y der Streukörperposition in x- und y-Richtung bestimmt. Diese wird, analog zum Vorgehen im vorangegangenen Abschnitt, als Standardunsicherheit der Positionsbestimmung $\sigma_{x,zuf,2}$ aufgrund der Zinkpartikel interpretiert:

$$\frac{\sigma_{x,zuf,2}}{\lambda} = \begin{pmatrix} 0,045 \\ 0,19 \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Zusammenfassung der Positionsunsicherheiten

Die ermittelten Positionsunsicherheiten sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Die Darstellung erfolgt jeweils für die x und y-Komponente. Zusätzlich wurde die gesamte Positionsunsicherheit σ_x für die Lokalisierung eines Streupartikels dargestellt, welche aus

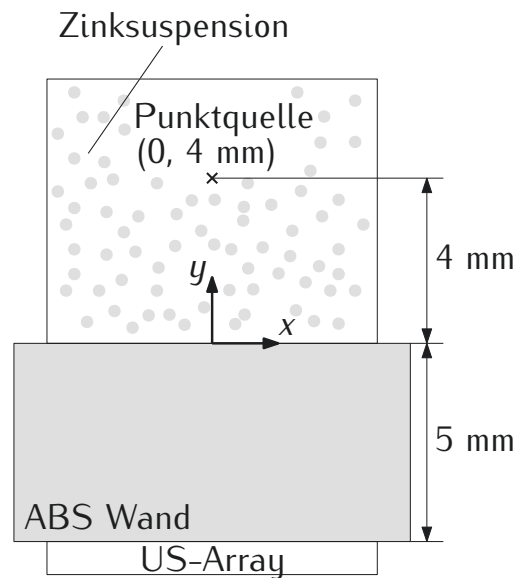


Abbildung 5.15: Simulationsanordnung für die Charakterisierung der zufälligen Messabweichung aufgrund der Zinkpartikel bei der Positionsbestimmung einer Punktquelle. Als Ultraschallwandler (US-Array) wird das HF-Array des Vermon-Zweifrequenz-Arrays genutzt (siehe 3.2.2). Parameter für die Simulation: Elastodynamische Finite Integrationstechnik [69], Ultraschallanregungsfrequenz $f = 12 \text{ MHz}$, 2 Signalperioden.

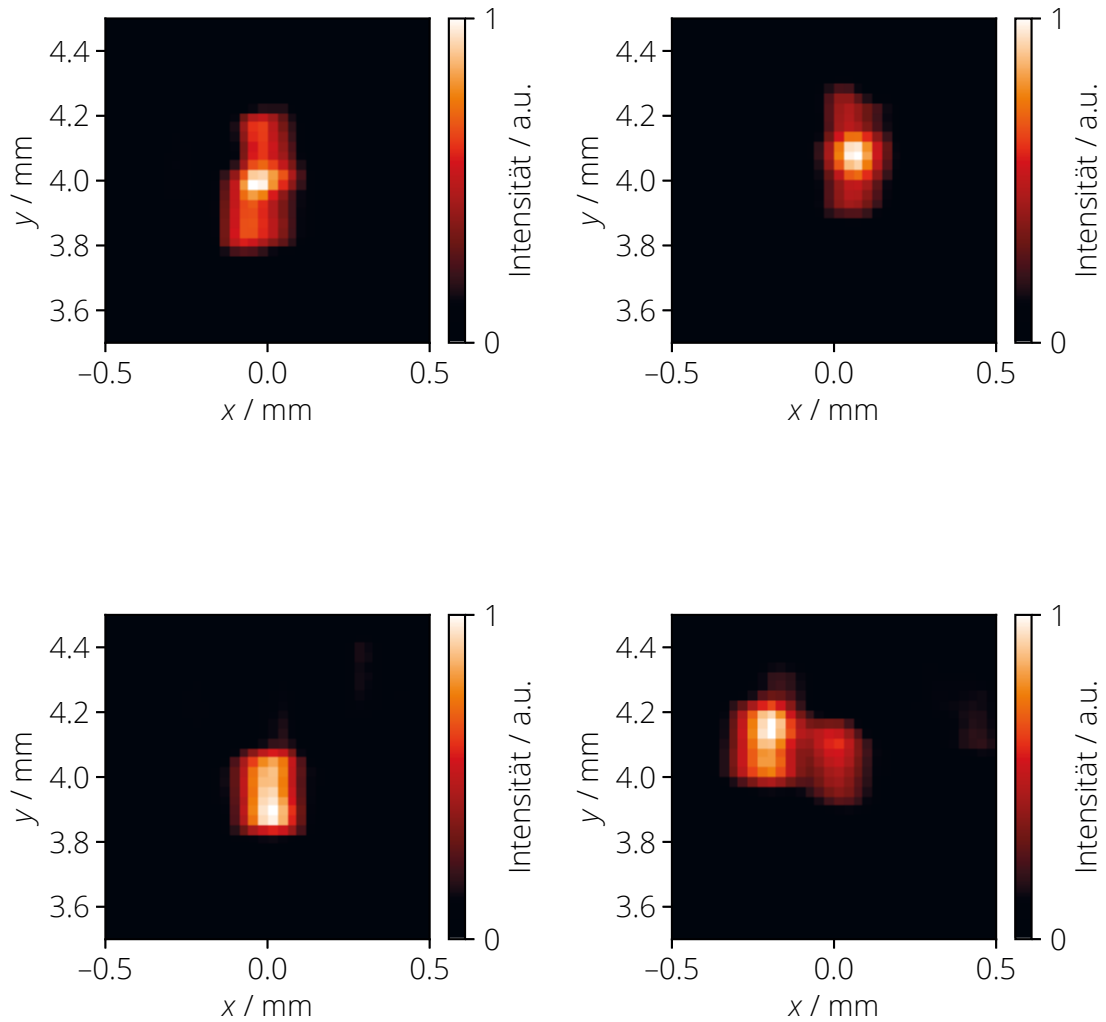


Abbildung 5.16: Abbildung der Punktschallquelle ($x = 0 \text{ mm}$, $y = 4 \text{ mm}$) aus der numerischen Simulation für vier verschiedene zufällige Anordnungen der Zinkpartikel.

den einzelnen Beiträgen wie folgt berechnet wird:

$$\sigma_x = \sqrt{(\sigma_{x,\text{sys},1})^2 + (\sigma_{x,\text{zuf},1})^2 + (\sigma_{x,\text{zuf},2})^2}. \quad (5.15)$$

Tabelle 5.4: Beiträge zur Positionsunsicherheit bei der Lokalisierung eines Streupartikels.

	$\sigma_{x,\text{sys},1}$	$\sigma_{x,\text{zuf},1}$	$\sigma_{x,\text{zuf},2}$	σ_x
normiert auf λ	$\begin{pmatrix} 0,077 \\ 0,073 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,02 \\ 0,024 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,045 \\ 0,19 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,091 \\ 0,205 \end{pmatrix}$
absolute Angabe in μm	$\begin{pmatrix} 26 \\ 22 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6,7 \\ 8 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 15 \\ 63 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 30 \\ 67 \end{pmatrix}$

5.3.3 Untersuchung der Geschwindigkeitsunsicherheit

Die Geschwindigkeitsunsicherheit σ_{v_x} setzt sich aus den in Tabelle 5.5 gelisteten Unsicherheiten zusammen und kann wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{v_x} = \sqrt{\sigma_{v_x,\text{sys}}^2 + \sigma_{v_x,\text{zuf}}^2 + \sigma_{v_x,\text{res}}^2} \quad (5.16)$$

Die einzelnen Unsicherheitsbeiträge sollen im Folgenden bestimmt werden.

Tabelle 5.5: Beiträge zur Messunsicherheit der Geschwindigkeit v_x bei der Messung in der ZLFB.

Beitrag	Ursache
$\sigma_{v_x,\text{sys}}$	Positionsunsicherheit aufgrund unbekannter systematischer Messabweichungen in x-Richtung: $\sigma_{x,\text{sys},1}$
$\sigma_{v_x,\text{zuf}}$	Positionsunsicherheit aufgrund zufälliger Messabweichungen in x-Richtung: $\sigma_{x,\text{zuf},1}$ und $\sigma_{x,\text{zuf},2}$
$\sigma_{v_x,\text{res}}$	begrenzte Ortsauflösung in y-Richtung, Positionsunsicherheit in y-Richtung: σ_y

Geschwindigkeitsunsicherheiten $\sigma_{v_x,\text{sys}}$ und $\sigma_{v_x,\text{zuf}}$

Zunächst soll die Geschwindigkeitsunsicherheit aufgrund der systematischen und zufälligen Messabweichung der Positionsbestimmung in x-Richtung ($\sigma_{x,\text{sys},1}$, $\sigma_{x,\text{zuf},1}$, $\sigma_{x,\text{zuf},2}$)

betrachtet werden. Es wird zuerst die Unsicherheit der Geschwindigkeit $\sigma_{v_x,i}$ einer Trajektorie i bestimmt. Dabei wird Gleichung 5.7 als Modellgleichung für die Bestimmung der Geschwindigkeit v_x entlang einer Trajektorie genutzt. Für die Geschwindigkeitsunsicherheit $\sigma_{v_x,i,\text{sys}}$ der Trajektorie i aufgrund der systematischen Messabweichung der Positionsbestimmung ergibt sich:

$$\sigma_{v_x,i,\text{sys}} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_{x,i}}{\partial x_{M_i}} \sigma_{x,\text{sys}}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_{x,i}}{\partial x_0} \sigma_{x,\text{sys}}\right)^2} \quad (5.17)$$

$$= \frac{\sqrt{2}f_{\text{prf}}}{(M_i - 1)} \sigma_{x,\text{sys},1} \quad (5.18)$$

Analog ergibt sich für die Geschwindigkeitsunsicherheit $\sigma_{v_x,i,\text{zuf}}$ der Trajektorie i aufgrund der zufälligen Messabweichung der Positionsbestimmung:

$$\sigma_{v_x,i,\text{zuf}} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_{x,i}}{\partial x_{M_i}} \sigma_{x,\text{zuf}}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_{x,i}}{\partial x_0} \sigma_{x,\text{zuf}}\right)^2} \quad (5.19)$$

$$= \frac{\sqrt{2}f_{\text{prf}}}{(M_i - 1)} \sigma_{x,\text{zuf}} \quad (5.20)$$

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass M_i die Anzahl der Positionen entlang der Trajektorie i kennzeichnet. Mehrere Geschwindigkeitswerte $v_{x,i}$ werden innerhalb eines Intervalls entlang der y -Achse durch eine Mittelwertbildung zusammengefasst:

$$v_x = \frac{1}{N_{\text{traj}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{traj}}} v_{x,i}. \quad (5.21)$$

Die Geschwindigkeitsunsicherheit aufgrund der systematischen Messabweichung bei der Positionsbestimmung $\sigma_{v_x,\text{sys}}$ lässt sich berechnen als:

$$\sigma_{v_x,\text{sys}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{traj}}} \left(\frac{\partial v_x}{\partial v_{x,i}} \sigma_{v_x,i}\right)^2 + 2 \sum_{j=1}^{N_{\text{traj}}-1} \sum_{k=j+1}^{N_{\text{traj}}} \frac{\partial v_x}{\partial v_{x,j}} \frac{\partial v_x}{\partial v_{x,k}} \sigma_{v_x,j,\text{sys}} \sigma_{v_x,k,\text{sys}} \kappa(v_{x,j}, v_{x,k})}. \quad (5.22)$$

Dabei stellt N_{traj} die Anzahl der der Trajektorien in einem Intervall und $\kappa(v_{x,j}, v_{x,k})$ die Korrelation zwischen den Geschwindigkeitswerten dar. Da die Ursache der Messunsicherheit systematisch ist, sind die einzelnen Geschwindigkeitswerte nicht unabhängig. Es wird daher eine Korrelation von $\kappa(v_{x,j}, v_{x,k}) = 1$ angenommen, um den ungünstigsten Fall in Betracht zu ziehen. Die zuvor genannte Formel lässt sich dann wie folgt vereinfachen:

$$\sigma_{v_x,\text{sys}} = \frac{1}{N_{\text{traj}}} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{traj}}} \sigma_{v_x,i,\text{sys}} \right) \quad (5.23)$$

$$= \frac{1}{N_{\text{traj}}} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{traj}}} \frac{\sqrt{2}f_{\text{prf}}}{(M_i - 1)} \sigma_{x,\text{sys}} \right) \quad (5.24)$$

Analog kann die Messunsicherheit der Geschwindigkeit aufgrund der zufälligen Messabweichung fortgepflanzt werden. Allerdings wird dabei von unkorrelierten Messungen ausgegangen und die Korrelation ist somit $\kappa(v_{x,j}, v_{x,k}) = 0$. Somit erhält man für die zufällige Messunsicherheit $\sigma_{v_x, \text{zuf}}$:

$$\sigma_{v_x, \text{zuf}} = \frac{1}{N_{\text{traj}}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{traj}}} \sigma_{v_x, i, \text{zuf}}^2} \quad (5.25)$$

$$= \frac{1}{N_{\text{traj}}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{traj}}} \left(\frac{\sqrt{2} f_{\text{prf}}}{(M_i - 1)} \sigma_{x, \text{zuf}} \right)^2} \quad (5.26)$$

Dabei wird die zufällige Positionsunsicherheit $\sigma_{x, \text{zuf}}$ als:

$$\sigma_{x, \text{zuf}} = \sqrt{\sigma_{x, \text{zuf}, 1}^2 + \sigma_{x, \text{zuf}, 2}^2} \quad (5.27)$$

bestimmt.

Geschwindigkeitsunsicherheit $\sigma_{v_x, \text{res}}$

Wie in Abschnitt 5.2.4 beschrieben erfolgt eine Quantisierung der y -Koordinate. In einem Quantisierungsintervall, im Folgenden als Intervall bezeichnet, werden die aus den einzelnen Trajektorien ermittelten Geschwindigkeiten $v_{x,i}(y_i)$ gemittelt. Im Ergebnis liegt für jedes Intervall ein Geschwindigkeitswert $v_x(y)$ vor. Die Größe eines Intervalls wird dabei durch δ_y beschrieben und sie definiert die örtliche Auflösung des ermittelten Strömungsprofils. Um die maximale Ortsauflösung zu erreichen, sollte $\delta_y = \sigma_y$ gelten. Für $\delta_y > \sigma_y$ wird die erreichte Ortsauflösung zu Gunsten einer geringeren Messunsicherheit der Geschwindigkeit $\sigma_{v_x, \text{zuf}}$ reduziert. Allerdings entsteht aufgrund der räumlichen Mittlung eine Messabweichung, welche von der Intervallgröße sowie dem Geschwindigkeitsgradienten in diesem Intervall abhängt.

Zur Abschätzung der daraus resultierenden Messunsicherheit soll zunächst die maximale systematische Geschwindigkeitsabweichung aufgrund der Mittlung bestimmt werden. Dazu wird angenommen, dass der Geschwindigkeitsgradient $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ in einem Intervall konstant ist. Die maximale systematische Messabweichung lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$\Delta \hat{v}_x = \frac{1}{2} \frac{\partial v_x}{\partial y} \delta_y. \quad (5.28)$$

Für die Abschätzung der maximalen systematischen Geschwindigkeitsabweichung wird der in einer numerischen Strömungssimulation bestimmte Gradient $\frac{\partial v_{x, \text{sim}}}{\partial y}$ herangezogen. Für die Simulation wurde das in [81] beschriebene HB-Modell verwendet. Die resultierende Messunsicherheit kann wie folgt angegeben werden:

$$\sigma_{v_x, \text{res}} = \frac{\Delta \hat{v}_x}{\sqrt{3}} = \delta_y \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{\partial v_{x, \text{sim}}}{\partial y}. \quad (5.29)$$

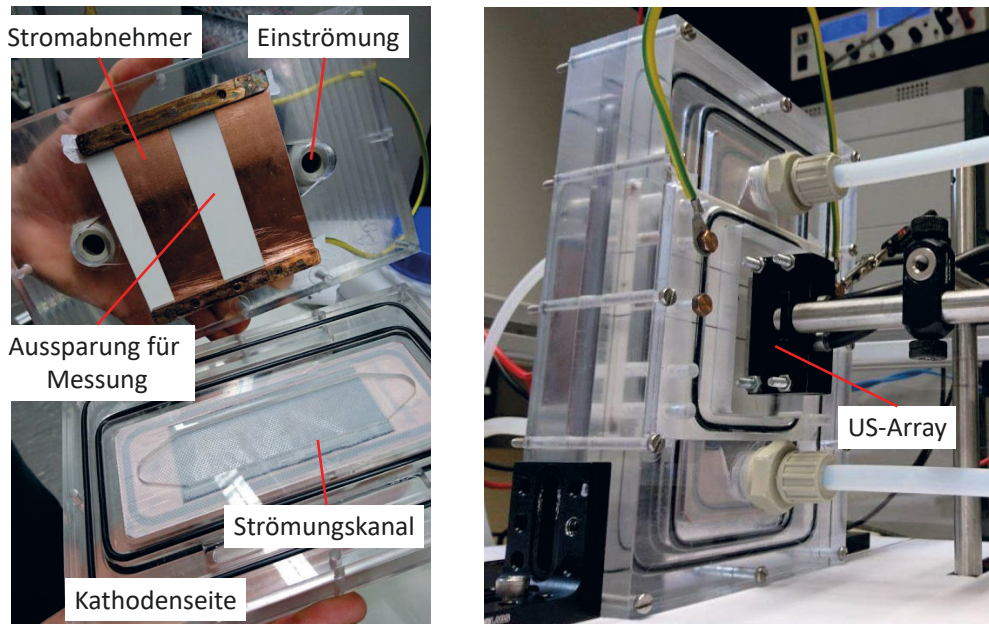


Abbildung 5.17: Bilder der geöffneten ZLFB (links) und der experimentellen Anordnung (rechts).

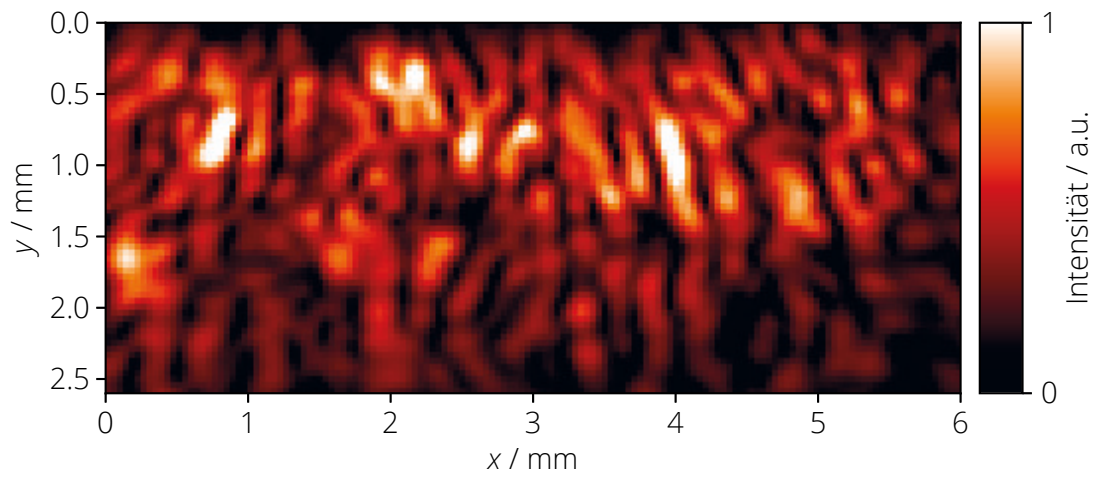
Aus den beschriebenen Messunsicherheiten kann die Gesamtmessunsicherheit für eine spezifische Messung aus den experimentellen Daten angegeben werden, wobei die tatsächliche Länge der Trajektorien M_i berücksichtigt wird.

5.4 Messung an einer aktiven Zink-Luft-Flussbatterie

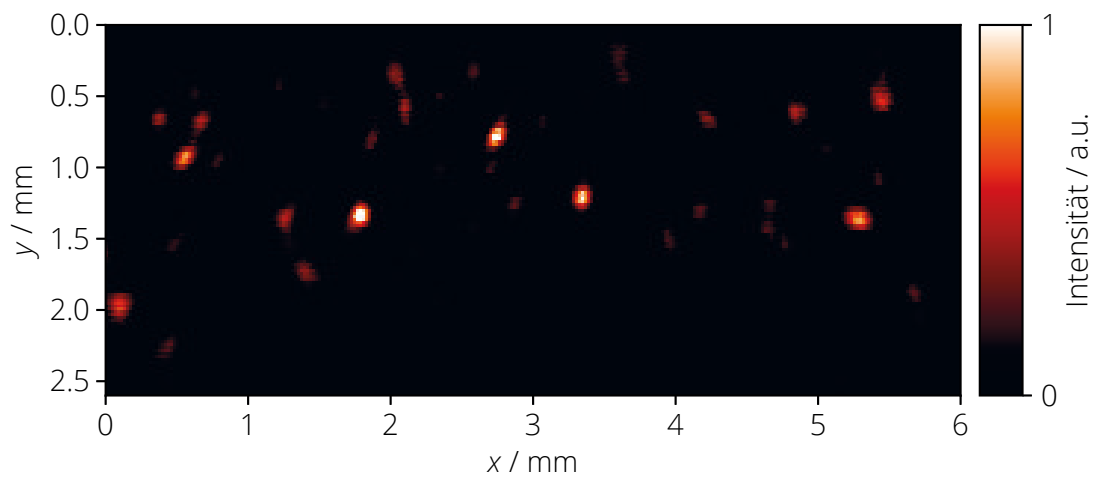
5.4.1 Aufbau und Durchführung

In Abbildung 5.17 ist links die geöffnete ZLFB und rechts der Messaufbau dargestellt. Die Messung erfolgte in situ in der aktiven ZLFB. Die verwendeten Messsystemparameter sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst. Vor der Auswertung wird ein Ausreißertest vorgenommen. Dazu werden einerseits nur Trajektorien in die Berechnung einbezogen, welche aus mindestens zehn Positionsmessungen eines Partikels bestehen. Außerdem werden Geschwindigkeitsmesswerte $v_{x,i}$ außerhalb des 3σ -Intervalls um den Mittelwert verworfen.

In Abbildung 5.18 sind die Ultraschallbilder aus der betriebenen ZLFB für den DAS und den DS-DMAS dargestellt. Wie zu erwarten bildet sich bei der Nutzung des DAS ein starkes Speckle-Muster aus. Eine Lokalisierung und Verfolgung einzelner isolierter Partikel ist nicht möglich. Für den DS-DMAS hingegen können isolierte Abbilder der nichtlinearen Streukörper abgebildet werden.



(a) DAS



(b) DS-DMAS

Abbildung 5.18: Vergleich der bei der Messung in der ZLFB aufgenommenen Ultraschallbilder mit (a) dem DAS und (b) dem DS-DMAS.

5.4.2 Messergebnisse

Das Ergebnis der Messung an der betriebenen ZLFB ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Entsprechend den Erwartungen ist das Strömungsprofil näherungsweise symmetrisch und die maximale Geschwindigkeit tritt in der Mitte des Kanals auf. Eine Auswertung der gemessenen Geschwindigkeiten für $y > 2,2 \text{ mm}$ ist nicht möglich. Ursache dafür sind Reflexionen an der Kanalwand sowie die große Propagationslänge durch das Fluid und die daraus resultierende starke Dämpfung und Streuung. Das Strömungsprofil weist hohe Gradienten zu den Wänden und einen flachen Verlauf in der Mitte des Kanals auf. Dies ist charakteristisch für Fluide mit scherverdünnenden Eigenschaften. Des Weiteren kann, wie auch bei der Untersuchung im Modellexperiment in Abschnitt 4.4, ein Wandgleiten beobachtet werden, welches für Mikrogele basierend auf polymeren Bindern (hier poly acrylic acid (dt.: Polyacrylsäure) (PAA)) mehrfach beschrieben wurde [15, 75]. Die Wandgleitgeschwindigkeit hängt sowohl vom Wandmaterial als auch von den rheologischen Eigenschaften des Fluides ab und beträgt für die Messung an beiden Wänden $v_{x,\text{Wand}} \approx 3 \text{ mm s}^{-1}$.

In Abbildung 5.19 ist zusätzlich die Messunsicherheit der Geschwindigkeit σ_{v_x} sowie die einzelnen Unsicherheitsbeiträge dargestellt. Die zufällige Messunsicherheit $\sigma_{v_x,\text{zuf}}$ steigt entsprechend den Erwartungen mit höherer Eindringtiefe (steigende y -Werte) an, da die Propagationslänge des Ultraschalls durch die Suspension steigt. Hinsichtlich der Gesamtunsicherheit σ_{v_x} ist diese allerdings vernachlässigbar, da die Anzahl der Geschwindigkeitswerte über welche gemittelt wird, hoch ist. Die Unsicherheit aufgrund systematischer Messabweichungen $\sigma_{v_x,\text{sys}}$ steigt leicht mit höherer Eindringtiefe an. Grund dafür ist, dass die Trajektorien im Mittel für größere Eindringtiefen kürzer sind. Für den Bereich in der Mitte des Kanals $0,8 \text{ mm} < y < 2 \text{ mm}$ wird die Gesamtmessunsicherheit durch die systematischen Messabweichungen dominiert. Die Messunsicherheit aufgrund der begrenzten örtlichen Auflösung $\sigma_{v_x,\text{res}}$ ist an den Wänden des Kanals maximal und sinkt in der Mitte auf $\sigma_{v_x,\text{res}} = 0$ ab. Grund dafür sind die sehr hohen Gradienten des Strömungsprofils an den Wänden. Die Gesamtmessunsicherheit wird für $0 \text{ mm} < y < 0,8 \text{ mm}$ und $2 \text{ mm} < y < 2,6 \text{ mm}$ durch die Unsicherheit aufgrund der begrenzten Ortsauflösung dominiert.

Zusammenfassend konnte mit dem vorgestellten Messverfahren das Strömungsprofil in einer betriebenen ZLFB bestimmt werden. Dabei wurde eine Ortsauflösung von $67 \mu\text{m}$ (aus der Charakterisierung in Abschnitt 5.3.2) und eine maximale Geschwindigkeitsunsicherheit 1 mm s^{-1} erreicht. Die aufgenommenen Daten können verwendet werden, um numerische Modelle für die Abbildung der Strömung zu validieren.

5.4.3 Vergleich von Simulation und Messung

Für den Vergleich von Messung und Simulation werden die in Abschnitt 5.19 bereits eingeführten Modelle zur Beschreibung der Rheologie der Zinksuspension verwendet: Das HB-Modell, welches die zeitunabhängigen scherratenabhängigen Eigenschaften und die Fließgrenze der Zinksuspension berücksichtigt, sowie das erweiterte Rheologiemodell (adaptiertes HB-Modell), welches zusätzlich Thixotropie und Wandgleiten

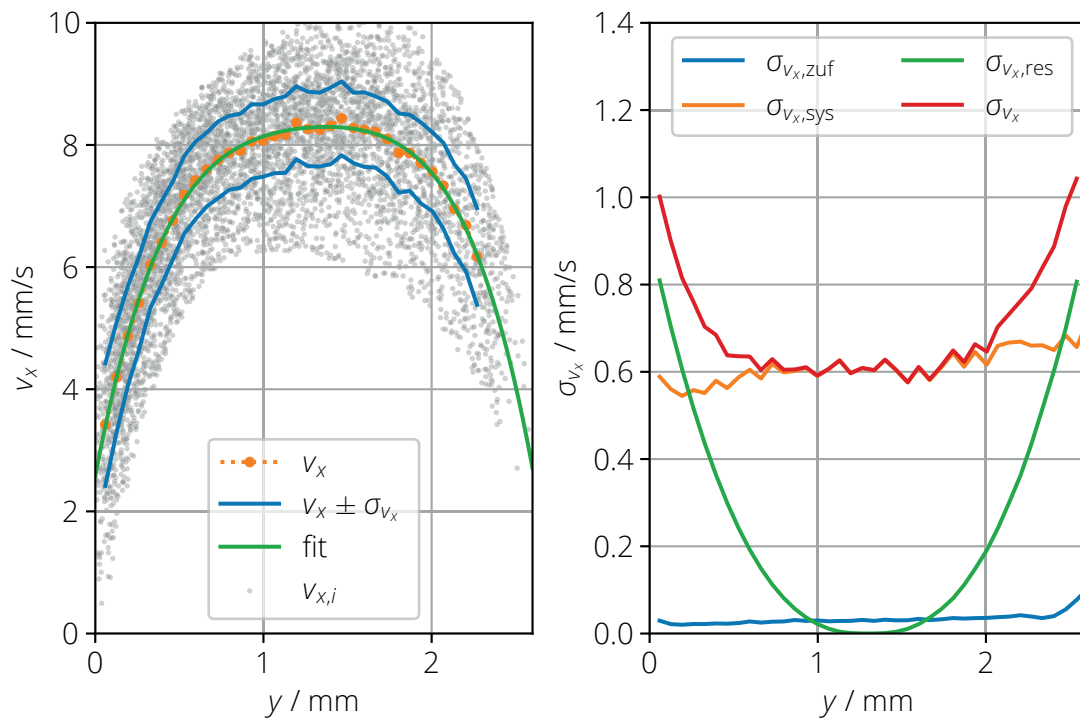


Abbildung 5.19: Links: Ergebnis der Strömungsmessung in der betriebenen ZLFB. Die aus den einzelnen Trajektorien ermittelten Geschwindigkeiten $v_{x,i}$ sind als graue Punkte dargestellt. Dabei wurden nur Geschwindigkeiten berücksichtigt, welche im $3\sigma_{v_x}$ -Intervall um den Mittelwert der Geschwindigkeit v_x liegen. Das Strömungsprofil wurde mit einem Polynom vierten Grades approximiert (grüne Linie, gekennzeichnet durch "fit"). Rechts: Beiträge zur Geschwindigkeitsunsicherheit sowie Gesamtunsicherheit der Geschwindigkeit

abbildet. Die dargestellten Simulationsergebnisse wurden von Lukas Feierabend vom Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH, Duisburg zur Verfügung gestellt.

In Abbildung 5.20 sind die Ergebnisse für die numerischen Simulationen sowie die Messung dargestellt. Für die Messung wurde dabei das durch das Polynom vierten Grades angenäherte Strömungsprofil mit der ermittelten Messunsicherheit abgebildet. Für das HB-Modell weist das Strömungsprofil sehr steile Gradienten an der Wand auf und ist flach in der Mitte des Kanals. Da ein Wandgleiten in diesem Modell noch nicht berücksichtigt wurde, ist die Geschwindigkeit an der Wand $v_x(y = 0) = v_x(y = 2,6 \text{ mm}) = 0$. Verglichen mit der Messung sind die Strömungsprofile qualitativ ähnlich. Messung und Simulation stimmen im Rahmen des Konfidenzintervalls der Messung in der Mitte des Kanals für $0,25 \text{ mm} < y < 2,35 \text{ mm}$ überein. Für die übrigen Bereichen an den Wänden liegt das Simulationsergebnis außerhalb des Konfidenzintervalls der Messung, da im realen Experiment ein Wandgleiten auftritt.

Das adaptierte HB-Modell berücksichtigt das Wandgleiten und die Geschwindigkeit an der Wand beträgt daher $v_x(y = 0) = v_x(y = 2,6 \text{ mm}) \approx 6,5 \text{ mm s}^{-1}$. Das Profil ist wesentlich flacher als bei dem HB-Modell und es tritt nahezu keine Scherung des Fluides auf. Verglichen mit der Messung liegt nahezu das gesamte Profil des adaptierten HB-Modells außerhalb des Konfidenzintervalls der Messung. Das bedeutet, dass das Wandgleiten zwar abgebildet werden kann, aber die Wandgleitgeschwindigkeit in der Simulation deutlich überschätzt wurde. Thixotrope Effekte, das heißt zeitveränderliche rheologische Eigenschaften, spielen bei der Abbildung der Strömung in der ZLFB eine untergeordnete Rolle, da weder eine Umlenkung der Strömung noch eine Verbreiterung des Kanals statt finden. Um eine korrekte Abbildung der Strömung mit dem adaptierten HB-Modell zu gewährleisten, muss allerdings der aktuelle Zustand (ist das Fluid vor dem Kanal geschert oder nicht) des Fluides bekannt sein und entsprechend berücksichtigt werden. Im Ergebnis müssen also die Modellparameter für die Wandgeschwindigkeit sowie die zeitabhängige Rheologie anhand von Messdaten kalibriert werden.

Zusammenfassend konnte durch den Vergleich von Messung und Simulation gezeigt werden, dass die Abbildung der Kanalströmung mit dem HB-Modell nicht vollständig korrekt erfolgt, da das Wandgleiten nicht berücksichtigt wird. Mit der Erweiterung des Modells konnte das Wandgleiten abgebildet werden. Allerdings erfordert das erweiterte Modell aufgrund der zahlreichen Modellparameter (vgl. [81]) eine umfangreiche Kalibrierung. Dazu werden entweder detaillierte zeitabhängige rheologische Messungen mit rauen Geometrien und zusätzlich Messungen zur richtigen Parametrierung des Wandgleitmodells, oder es werden ähnlich wie hier dargestellte Strömungsmessdaten für weitere Fälle (z.B. mehrere Strömungsgeschwindigkeiten) benötigt.

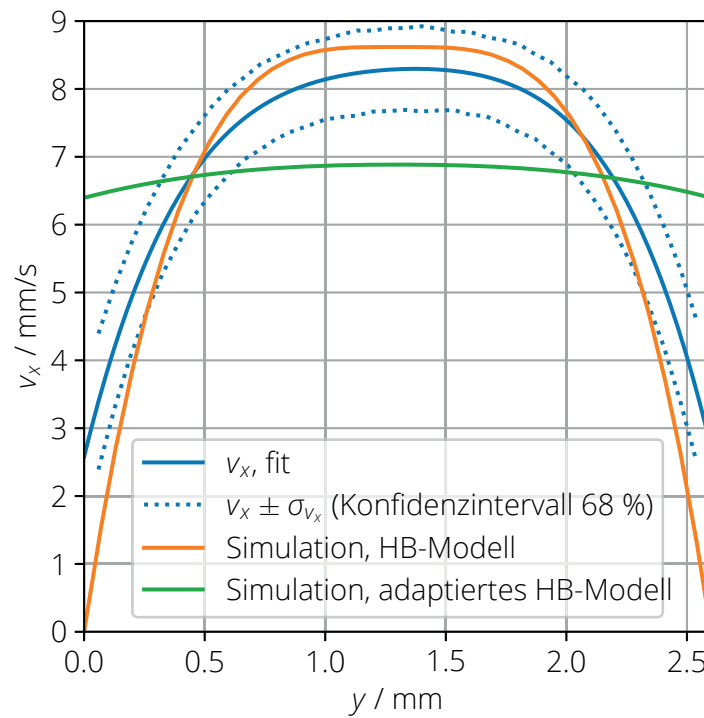


Abbildung 5.20: Vergleich von gemessenem und simuliertem Strömungsprofil in der aktiven ZLFB. Für die Darstellung der gemessenen Geschwindigkeit wurde die Approximation mittels Polynom vierten Grades genutzt (gekennzeichnet durch "fit").

Tabelle 5.6: Parameter für die Messung an der aktiven ZLFB.

Parameter	Wert
Fluid	Zinksuspension ($\nu = 8$ vol.-%, Partikelklasse 2)
Volumenstrom	$417 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$
Messung	
Anregungssignal	Ultraschallmittenfrequenz $f = 6 \text{ MHz}$, 2 Perioden, Rechteckimpuls
Ultraschallwandler	Vernon-Zweifrequenz-Array (vgl. 3.2.2), 42 Wandlerelemente sendeseitig (LF-Array), 96 Wandlerelemente empfangsseitig (HF-Array) genutzt
Pulswiederholrate f_{prf}	200 Hz
Anzahl der aufgenommenen Bilder	10000 (je eine invertierte und ein nicht invertierte Pulsaussendung pro Bild)
Pulsinversionsintervall	$250 \mu\text{s}$
Bildgebung	
Clutter-Filter	nein
Größe eines Gates	$0,5 \lambda$ (bezogen auf $\lambda = 6 \text{ MHz}$)
Anzahl der Gates pro Wellenlänge (bezogen auf $\lambda = 6 \text{ MHz}$)	16
Strahlformer	DS-DMAS
Untere und obere Grenzfrequenz des verwendeten Bandpassfilters	10,2 MHz, 16,8 MHz
Geschwindigkeitsschätzung	
Geschätzter Durchmesser des Partikels im Ultraschallbild	$375 \mu\text{m}$
Mindestlänge einer Trajektorie	10 aufeinanderfolgende Positionsmessungen
Intervallgröße δ_y	$\sigma_y = 67 \mu\text{m}$
Maximaler Versatz eines Partikels zwischen zwei Bildern	$100 \mu\text{m}$
Maximal messbare Partikelgeschwindigkeit	20 mm s^{-1}

5.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde ein Messverfahren zur Erfassung der Strömung in einer betriebenen ZLFB vorgestellt. Die besondere Herausforderung bestand in der hohen geforderten Ortsauflösung. Diese konnte durch die Anwendung eines Messverfahrens bewältigt werden, welches Ortsauflösungen jenseits des Beugungslimits erlaubt. Dieses Verfahren beruht auf der Anwendung des HI in Kombination mit einem kohärenzgewichteten Strahlformer und dem Particle Tracking. Das Messverfahren wurde charakterisiert und eine Positionsunsicherheit bei der Partikellokalisierung von $30\text{ }\mu\text{m}$ in x - und $67\text{ }\mu\text{m}$ in y -Richtung erreicht. Die Ortsauflösung des gemessenen Geschwindigkeitsprofils beträgt $67\text{ }\mu\text{m}$, wobei in Strömungsrichtung über den Messbereich von 6 mm gemittelt. Durch die Messung der Strömung in einer aktiven ZLFB konnte gezeigt werden, dass die derzeit verwendeten numerischen Modelle prinzipiell in der Lage sind, die auftretenden Strömungsphänomene zu beschreiben. Allerdings bedarf es einer umfangreichen Kalibrierung, um die korrekten Modellparameter einzustellen. Dazu werden Messdaten benötigt, welche mit dem vorgestellten Messverfahren erlangt werden können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Suspensionsströmungen spielen in zahlreichen technischen und industriellen Prozessen eine wesentliche Rolle. Ihrer Messung kommt in zweierlei Hinsicht eine wesentliche Rolle zu: Einerseits können experimentelle Strömungsmessdaten zum Verständnis der auftretenden Strömungsvorgänge beitragen und zur Kalibrierung und Validierung numerischer Modelle zur Abbildung von Suspensionsströmungen genutzt werden. Andererseits kann mittels einer In-situ-Messung im Prozess eine direkte Korrelation zwischen Strömung und einer zu optimierenden Prozessgröße hergestellt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Strömungsmesstechniken am Beispiel der fließenden Suspensionselektrode in einer Zink-Luft-Flussbatterie (ZLFB) untersucht. Im Ergebnis konnten zwei Verfahren für die Messung von Suspensionsströmungen adaptiert bzw. weiterentwickelt, untersucht und angewendet werden. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ortsauflösung, der Größe des Messbereichs und der Dimensionalität der Messung. Die gewonnenen Erkenntnisse und der erzielte Fortschritt hinsichtlich der Messtechnik und der Anwendung werden im Folgenden separat für die beiden Messverfahren vorgestellt.

6.1 Erkenntnisse und Fortschritt

6.1.1 Ultrasound Imaging Velocimetry

Messtechnik

Für ein tieferes Verständnis des strömungsmechanischen Verhaltens von Suspensionen werden Messungen an komplexen Strömungsstrukturen durchgeführt. Dafür wird eine 2D2C-Strömungsmessung im Fluidvolumen der Zinksuspension benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst der Effekt der Zinkpartikel auf die Schallausbreitung untersucht, um ein geeignetes Geschwindigkeitsmessverfahren zu identifizieren. Durch die Partikel kommt es zu einer Phasen- und Amplitudenstörung der empfangenen Ultraschallsignale. Es konnte gezeigt werden, dass die Ultraschall-Doppler-Velozimetrie (UDV) eine um 50 % höhere zufällige Messunsicherheit aufweist als die Ultrasound Imaging Velocimetry (dt.: Ultraschall-Partikelbild-Velozimetrie) (UIV). Ursache ist die Empfindlichkeit der UDV gegenüber den eingebrachten Phasenstörungen. Anhand einer Kalibrierung wurden die Messsystemparameter der UIV optimiert und die Messunsicherheit charakterisiert. Für den optimalen Arbeitspunkt bei einer Ultraschallfrequenz von 6 MHz und einer Ortsauflösung von 1,66 mm beträgt die Messunsicherheit axial zur Schallausbreitungsrichtung 2,5 % und lateral zur Schallausbreitungsrichtung 4,1 %. Anhand der Messung am Newtonschen Fluid Glycerin wurde das

Messsystem validiert und die Anwendbarkeit auf reale Strömungsfelder demonstriert. Die optimierte UIV ermöglicht erstmals die ultraschallbasierte zweidimensionale und zweikomponentige Strömungsmessung der Zinksuspension und anderer Suspensionen mit ähnlichen Eigenschaften.

Anwendung

Die UIV wurde für Messungen der Suspensionsströmung in einem Modellexperiment mit Strömungsumlenkung und -aufweitung angewendet. Dabei konnte ein 2D2C-Strömungsfeld mit einer Größe von $20 \times 15 \text{ mm}^2$ und einer örtlichen Auflösung von 1 mm erfasst werden. Der Vergleich der Messergebnisse von Zinksuspension und dem gleichen Fluid ohne Partikel (Elektrolyt) zeigte wesentliche Unterschiede. Der Elektrolyt weist bereits eine ausgeprägte Fließgrenze sowie ein Wandgleiten auf. Aufgrund der zugesetzten Partikel hängt die Rheologie der Zinksuspension zusätzlich von der Scherhistorie ab. Dieser Effekt wird als Thixotropie bezeichnet. Dadurch ändert sich das Strömungsfeld im Vergleich zum Elektrolyt signifikant und es kommt zur Ausbildung einer Totzone. Derartige Gebiete niedriger Strömungsgeschwindigkeit sollten in einer aktiven ZLFB vermieden werden, da sich dort Reaktionsprodukte verfestigen und den Kanal verstopfen können.

Der Vergleich zwischen Messung und einer einfachen numerischen Simulation mit rein scherratenabhängigem Rheologiemodell (Herschel-Bulkley), die anfangs zur Untersuchung der Zinksuspension genutzt wurde, ergab wesentliche Unterschiede. Beispielsweise konnte die in der Messung beobachtete Totzone durch die Simulation nicht abgebildet werden. Mit einem um das Wandgleiten und die Thixotropie erweiterten rheologischen Modell, konnte die Ausbildung und Größe der Totzone allerdings numerisch rekonstruiert werden. Die Auswahl eines geeigneten rheologischen Modells zur Beschreibung der Suspensionsströmung konnte folglich nur durch den Vergleich mit experimentell ermittelten Strömungsdaten erfolgen.

6.1.2 Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry

Messtechnik

Die Super Resolution Ultrasound Particle Tracking Velocimetry (SRPTV) stellt eine Weiterentwicklung eines Super-Resolution-Verfahrens aus der medizinischen Ultraschallbildgebung, der Ultrasound Localization Microscopy (ULM), dar. Durch die in dieser Arbeit vorgestellten Erweiterungen, kann die SRPTV auf die Messung in stark streuenden Suspensionen angewendet werden, was eine In-situ-Messung der Strömung in einer aktiven ZLFB mit einer Ortsauflösung von unter $100 \mu\text{m}$ ermöglicht. Die Grundidee der ULM lässt sich wie folgt formulieren: Durch die Abbildung isolierter Streupartikel kann deren Position mit einer Genauigkeit unterhalb des Beugungslimits bestimmt werden. Damit wird eine hohe Ortsauflösung bei möglichst kleiner Ultraschallfrequenz und somit großer Eindringtiefe erreicht. Durch die Verfolgung der lokalisierten Partikel kann

das Strömungsfeld mit hoher örtlicher Auflösung bestimmt werden. Aufgrund der hohen Partikeldichte ist die Darstellung einzelner Partikel in der Zinksuspension nicht möglich. Es werden daher zusätzliche nichtlineare Streukörper (medizinische Mikrobläschen mit einem mittleren Durchmesser von $1,3\text{ }\mu\text{m}$) in geringer Konzentration eingebracht und mittels Harmonic Imaging (dt.: nichtlineare Bildgebung) (HI) isoliert abgebildet. Es wurde gezeigt, dass die Mikrobläschen in der stark alkalischen Zinksuspension über mehrere Minuten stabil sind und auch durch das Pumpen nicht zerstört werden. Für die Trennung des nichtlinearen und linearen Signalanteils beim HI ist eine Filterung vor der Digitalisierung der Ultraschallsignale erforderlich. Dazu wurde ein Zwei-Frequenz-Ultraschallwandler ausgelegt und ein geeignetes Ansteuerschema genutzt. Beim HI kommt es trotz des ausreichend großen Abstandes zwischen den Mikrobläschen zur Ausbildung starker Bildstörungen und Speckle. Ursache ist die Streuung der von den Mikrobläschen ausgehenden Ultraschallwellen an den Zinkpartikeln. Mittels Signalverarbeitung können Streusignale und kohärente Signalanteile getrennt und somit die Abbildung isolierter Partikel erreicht werden. Dabei werden die durch die einzelnen Ultraschallelemente aufgenommenen Signale miteinander korreliert. Die Korrelation ist hoch, wenn das empfangene Signal eine hohe örtliche Kohärenz aufweist. Dies ist für die Ultraschallwelle, welche von einem Mikrobläschen ausgeht gegeben, jedoch nicht für Streusignale. Im Ergebnis können isolierte Mikrobläschen abgebildet und eine Geschwindigkeitsbestimmung vorgenommen werden.

Die SRPTV wurde für die Messung in der Zinksuspension charakterisiert. Die Positionsunsicherheit bei der Lokalisierung der Mikrobläschen beträgt axial zur Schallausbreitungsrichtung $67\text{ }\mu\text{m}$ und lateral zur Schallausbreitungsrichtung $30\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Anregungswellenlänge von $330\text{ }\mu\text{m}$. Bei der medizinischen Anwendung des Super-Resolution-Verfahrens [45] konnten Auflösungen von etwa $\frac{\lambda}{10}$ erreicht werden. Aufgrund der Streuung ist die in der Zinksuspension erreichbare Auflösung geringer und beträgt $\frac{\lambda}{5}$ bezogen auf die Wellenlänge des Anregungssignals. Bei der Messung der Strömung in einer aktiven ZLFB wurde eine maximale Geschwindigkeitsunsicherheit von 1 mm s^{-1} bei einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von etwa 8 mm s^{-1} ermittelt. An den Wänden dominiert wegen der hohen Geschwindigkeitsgradienten die Messunsicherheit aufgrund der begrenzten Ortsauflösung des Messverfahrens. Im übrigen Bereich dominiert die Messunsicherheit aufgrund der systematischen Abweichung bei der Positionsbestimmung der Streupartikel. Die Auflösung des gemessenen Geschwindigkeitsprofils beträgt $67\text{ }\mu\text{m}$, wobei in Strömungsrichtung über den Messbereich von 6 mm gemittelt.

Mit der SRPTV konnte erstmals eine Strömungsmessung in einer aktiven ZLFB durchgeführt werden.

Anwendung

Das in der aktiven ZLFB gemessene Strömungsprofil ist pfropfenförmig und weist ein Wandgleiten auf. Der Vergleich mit einer numerischen Simulation ohne Wandgleiten und ohne Berücksichtigung der Thixotropie zeigt eine Übereinstimmung im Rahmen

des Konfidenzintervalls (68 %) in der Mitte des Kanals. Allerdings weicht die Geschwindigkeit an der Wand um $\approx 30\%$ der maximalen Geschwindigkeit von der Messung ab. Bei Berücksichtigung des Wandgleitens mit dem weiterentwickelten Modell und den entsprechenden Parametern für die in Abschnitt 4.4.2 gemessene Strömung ergab sich aus der Simulation der Kanalströmung in der aktiven ZLFB eine um $\approx 80\%$ der maximalen Geschwindigkeit zu hohe Wandgeschwindigkeit. Es ist demnach eine weitere Kalibrierung des numerischen Modells notwendig, wofür weitere Messungen bei anderen Volumenströmen verwendet werden sollten. Perspektivisch wird so ein numerisches Modell zur Abbildung der Zinksuspensionsströmung in einer einfachen Kanalgeometrie geschaffen, welches sowohl die Form des Strömungsprofils als auch das Wandgleiten korrekt abbildet.

6.1.3 Fazit

Mit den vorgestellten Messverfahren stehen wirkungsvolle Werkzeuge zur Untersuchung von Suspensionen und im Speziellen der Zinksuspension zur Verfügung. Dies ermöglicht einerseits die Weiterentwicklung numerischer Modelle für die Strömungssimulation und andererseits die strömungsmechanische Untersuchung von technischen Prozessen, in welchen Suspensionen eine Rolle spielen. Erste Erkenntnisse aus den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen haben zur Erweiterung der für die Zinksuspension verwendeten numerischen Modelle geführt. Die Messverfahren können darüber hinaus in anderen Prozessen in denen Suspensionsströmungen eine wesentliche Rolle spielen angewendet werden, wie bei der Herstellung von Kosmetika, Pharmazeutika und Farben, in der Lebensmittelindustrie oder im Bergbau. Dies stellt im Vergleich zum Stand der Technik einen wesentlichen Fortschritt für die messtechnische Erfassung von Suspensionen in kleinen Geometrien dar.

6.2 Ausblick und weiterführende Arbeiten

6.2.1 Messtechnik

Untersuchung der Zeitauflösung

In dieser Arbeit wurden laminare, stationäre Strömungen der Zinksuspension betrachtet. Entsprechend wurde die Zeitauflösung der genutzten Messverfahren nicht berücksichtigt. Für Flow-Batterien konnte simulativ gezeigt werden, dass ein gepulster Volumenstrom die Effizienz verbessert [13]. Des Weiteren werden bei der technischen Umsetzung von ZLFB Systemen in der Regel Peristaltikpumpen genutzt, da somit der Kontakt des basischen Fluides mit metallischen, korrodierenden Bestandteilen der Pumpe vermieden wird. Diese Pumpen weisen oftmals eine starke Pulsation auf. In beiden Fällen kommt es also zu instationären Strömungen. Um diese zu vermessen, sollte in zukünftigen Arbeiten das Verhältnis von Zeitauflösung, Ortsauflösung und Geschwindigkeitsmessunsicherheit für die in dieser Arbeit gezeigten Messverfahren untersucht

werden.

Reduktion der Messunsicherheit

Die Messeigenschaften der UIV werden maßgeblich durch die starke Streuung der Ultraschallwelle an den Zinkpartikeln bestimmt, welche zur Ausbildung von Speckle führt. Ein Ansatz zur Reduktion dieser Störungen ist die Anwendung des Plane Wave Compounding (PWC) [88]. Dabei werden Ultraschallbilder mit mehreren ebenen Wellen unter verschiedenen Aussendewinkeln erzeugt. Für jeden Aussendewinkel erfährt die Ultraschallwelle eine spezifische Störung. Bei der Überlagerung der Signale werden kohärente Strukturen verstärkt während die Störungen unterdrückt werden. Dadurch kann die Messunsicherheit reduziert werden.

Für die SRPTV konnte gezeigt werden, dass die Geschwindigkeitsmessunsicherheit vorwiegend durch die systematischen Messabweichungen begrenzt wird. Ursache ist die Abweichung zwischen experimenteller Anordnung und ihrer Modellierung für die Strahlformung, was zu einer Abweichung der berechneten Zeitverzögerungen führt. Diese Abweichung wirkt sich bei der SRPTV besonders stark aus, da die Messregion sehr klein ist. Durch eine der Messung vorgeschaltete Kalibrierung könnte diese Messabweichung reduziert werden. Die Zeitverzögerungen müssen in diesem Fall aus der Reflexion des Ultraschallsignals an einem Streukörper mit bekannter Position bestimmt werden. Wird der Messaufbau nach der Kalibrierung nicht mehr verändert (keine Änderung der Fluideigenschaften, Temperatur oder Messanordnung) kann die systematische Messabweichung vollständig kompensiert werden. An Positionen mit hohem Geschwindigkeitsgradient dominiert die Messunsicherheit aufgrund der begrenzten Ortsauflösung, welche maßgeblich von der Schwankung der Partikelposition aufgrund der Streuung an den Zinkpartikeln abhängt. Diese könnte, wie auch bei der UIV durch die Anwendung des PWC reduziert werden.

Durch eine Reduktion der Messunsicherheit für beide Verfahren kann eine detailliertere Kalibrierung und Validierung numerischer Simulationsmodelle erfolgen und somit zu deren Weiterentwicklung beigetragen werden.

6.2.2 Anwendung

Strömungsmechanisches Verständnis der Zinksuspension

Im Modellexperiment wurde die Strömung zweikomponentig in einer Ebene gemessen. Die entstehende Strömungsstruktur ist aufgrund der komplexen Rheologie der Zinksuspension jedoch dreidimensional und erfordert weitere Messungen, um sie vollständig zu verstehen. Das rheologische Modell weist bei Berücksichtigung der nicht-Newtonschen Eigenschaften, des Wandleitens und der Thixotropie 14 Parameter auf, welche durch Messungen kalibriert werden müssen. Eine Kalibrierung all dieser Parameter ist anhand der Messung am vorgestellten Modellexperiment herausfordernd, da die auftretenden Effekte nicht klar voneinander getrennt werden können. Es sollten

daher weitere experimentelle Untersuchung an anderen Kanalgeometrien vorgenommen werden, welche eine separate Untersuchung der strömungsmechanischen Effekte erlauben. Zusätzlich sollten detaillierte zeitabhängige rheologische Messungen mit rauen Flächen durchgeführt werden, um die rheologischen Eigenschaften des Fluides unabhängig vom Einfluss des Wandleitens untersuchen zu können.

Optimierung der Strömung in Flussbatterien

Mit der aufgebauten ZLFB und der SRPTV ist es möglich, Parameterstudien zur Korrelation von Strömung und elektrischer Leistung der Zelle durchzuführen. Dies ermöglicht einerseits die Optimierung der Strömungsanordnung in der ZLFB und trägt damit zur Weiterentwicklung dieses Batterietyps bei. Außerdem können die Daten genutzt werden, um ein tieferes Verständnis für die Modellierung der elektrochemischen Prozesse in Verbindung mit Strömung zu erlangen. Dies ermöglicht langfristig den Entwurf von Flow-Batterien mittels numerischer Simulationen der Strömung sowie der Elektrochemie.

Durch die in dieser Arbeit vorgestellten Messverfahren, können Suspensionsströmungen in kleinen Geometrien besser verstanden und numerische Modelle weiterentwickelt werden. Dies ermöglicht perspektivisch die Optimierung technischer und industrieller Prozesse, in denen Suspensionsströmungen eine wesentliche Rolle spielen. Im Ergebnis können auf diese Weise Ressourcen geschont und ein Beitrag zum Umweltschutz geleistet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Challis, M. Povey, M. Mather und A. Holmes. „Ultrasound techniques for characterizing colloidal dispersions“. In: *Reports on progress in physics* 68.7 (2005), S. 1541.
- [2] K. B. Hatzell, M. Boota und Y. Gogotsi. „Materials for suspension (semi-solid) electrodes for energy and water technologies“. In: *Chemical society reviews* 44.23 (2015), S. 8664–8687.
- [3] A. Appleby und M. Jacquier. „The CGE circulating zinc/air battery: A practical vehicle power source“. In: *Journal of Power Sources* 1.1 (1976), S. 17–34.
- [4] Y. Li und H. Dai. „Recent advances in zinc–air batteries“. In: *Chemical Society Reviews* 43.15 (2014), S. 5257–5275.
- [5] R. K. Pachauri, M. R. Allen, V. R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ, J. A. Church, L. Clarke, Q. Dahe, P. Dasgupta et al. *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ipcc, 2014.
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). *Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende: Die Energie der Zukunft*. Techn. Ber. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2016.
- [7] Bundesregierung, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat Grundsatzfragen von Innovation und Transfer; Koordinierung. *Hightech-Strategie 2025*. 2019. URL: www.hightech-strategie.de/de/die-batteriezellproduktion-in-deutschland-aufbauen-1971.html.
- [8] P. Sapkota und H. Kim. „Zinc–air fuel cell, a potential candidate for alternative energy“. In: *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 15.4 (2009), S. 445–450.
- [9] G. Li, K. Zhang, M. A. Mezaal, R. Zhang und L. Lei. „Effect of electrolyte concentration and depth of discharge for zinc-air fuel cell“. In: *Int. J. Electrochem. Sci* 10 (2015), S. 6672–6683.
- [10] J. Fu, Z. P. Cano, M. G. Park, A. Yu, M. Fowler und Z. Chen. „Electrically rechargeable zinc–air batteries: progress, challenges, and perspectives“. In: *Advanced materials* 29.7 (2017), S. 1604685.
- [11] P. Pei, Z. Ma, K. Wang, X. Wang, M. Song und H. Xu. „High performance zinc air fuel cell stack“. In: *Journal of Power Sources* 249 (2014), S. 13–20.
- [12] E. Knudsen, P. Albertus, K. Cho, A. Weber und A. Kojic. „Flow simulation and analysis of high-power flow batteries“. In: *Journal of Power Sources* 299 (2015), S. 617–628.

- [13] K. C. Smith, Y.-M. Chiang und W. C. Carter. „Maximizing energetic efficiency in flow batteries utilizing non-Newtonian fluids“. In: *Journal of The Electrochemical Society* 161.4 (2014), A486–A496.
- [14] A. Puapattanakul, S. Therdthianwong, A. Therdthianwong und N. Wongyao. „Improvement of zinc-air fuel cell performance by gelled KOH“. In: *Energy Procedia* 34 (2013), S. 173–180.
- [15] J. Piau. „Carbopol gels: Elastoviscoplastic and slippery glasses made of individual swollen sponges: Meso-and macroscopic properties, constitutive equations and scaling laws“. In: *Journal of non-newtonian fluid mechanics* 144.1 (2007), S. 1–29.
- [16] R. J. Adrian. „Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics“. In: *Annual review of fluid mechanics* 23.1 (1991), S. 261–304.
- [17] R. J. Adrian. „Twenty years of particle image velocimetry“. en. In: *Experiments in Fluids* 39.2 (2005), S. 159–169. ISSN: 0723-4864. DOI: 10.1007/s00348-005-0991-7.
- [18] J. Czarske. „Laser Doppler velocimetry using powerful solid-state light sources“. In: *Measurement Science and Technology* 17.7 (2006), R71.
- [19] H. Maas, A. Gruen und D. Papantoniou. „Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows“. In: *Experiments in fluids* 15.2 (1993), S. 133–146.
- [20] A. Fischer, L. Büttner, J. Czarske, M. Eggert und H. Müller. „Measurement uncertainty and temporal resolution of Doppler global velocimetry using laser frequency modulation“. In: *Applied optics* 47.21 (2008), S. 3941–3953.
- [21] A. G. Koutsiaris, D. S. Mathioulakis und S. Tsangaris. „Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries“. In: *Measurement Science and Technology* 10.11 (1999), S. 1037.
- [22] M. Abbas und C. Crowe. „Experimental study of the flow properties of a homogenous slurry near transitional reynolds numbers“. In: *International journal of multiphase flow* 13.3 (1987), S. 357–364.
- [23] Z. Karnis, H. Goldsmith und S. Mason. „The kinetics of flowing dispersions: I. Concentrated suspensions of rigid particles“. In: *Journal of Colloid and Interface Science* 22.6 (1966), S. 531–553.
- [24] C. J. Elkins und M. T. Alley. „Magnetic resonance velocimetry: applications of magnetic resonance imaging in the measurement of fluid motion“. In: *Experiments in Fluids* 43.6 (2007), S. 823–858.
- [25] A. Van Dinter, C. Schroën, F. Vergeldt, R. Van der Sman und R. Boom. „Suspension flow in microfluidic devices - A review of experimental techniques focussing on concentration and velocity gradients“. In: *Advances in colloid and interface science* 173 (2012), S. 23–34.
- [26] T. Moraczewski, H. Tang und N. C. Shapley. „Flow of a concentrated suspension through an abrupt axisymmetric expansion measured by nuclear magnetic resonance imaging“. In: *Journal of rheology* 49.6 (2005), S. 1409–1428.

- [27] J. E. Butler und R. T. Bonnecaze. „Imaging of particle shear migration with electrical impedance tomography“. In: *Physics of fluids* 11.8 (1999), S. 1982–1994.
- [28] P. Faia, R. Silva, M. Rasteiro, F. Garcia, A. Ferreira, M. Santos, J. Santos und A. Coimbra. „Imaging particulate two-phase flow in liquid suspensions with electric impedance tomography“. In: *Particulate Science and Technology* 30.4 (2012), S. 329–342.
- [29] M. G. Rasteiro, R. C. Silva, F. A. Garcia und P. M. Faia. „Electrical tomography: a review of configurations and applications to particulate processes“. In: *KONA Powder and Particle Journal* 29 (2011), S. 67–80.
- [30] M. Barigou. „Particle tracking in opaque mixing systems: an overview of the capabilities of PET and PEPT“. In: *Chemical Engineering Research and Design* 82.9 (2004), S. 1258–1267.
- [31] M. Gholami, A. Rashedi, N. Lenoir, D. Hautemayou, G. Ovarlez und S. Hormozi. „Time-resolved 2D concentration maps in flowing suspensions using X-ray“. In: *Journal of Rheology* 62.4 (2018), S. 955–974.
- [32] Y. Fangary, M. Barigou, J. Seville und D. Parker. „Fluid trajectories in a stirred vessel of non-Newtonian liquid using positron emission particle tracking“. In: *Chemical Engineering Science* 55.24 (2000), S. 5969–5979.
- [33] L. Lynnworth und Y. Liu. „Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005“. In: *Ultrasonics* 44 (2006), e1371–e1378.
- [34] L. C. Lynnworth. *Ultrasonic measurements for process control: theory, techniques, applications*. Academic press, 2013.
- [35] N. Besic, G. Vasile, A. Anghel, T.-I. Petrut, C. Ioana, S. Stankovic, A. Girard und G. d’Urso. „Zernike ultrasonic tomography for fluid velocity imaging based on pipeline intrusive time-of-flight measurements“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 61.11 (2014), S. 1846–1855.
- [36] T. Wang, J. Wang, F. Ren und Y. Jin. „Application of Doppler ultrasound velocimetry in multiphase flow“. In: *Chemical Engineering Journal* 92.1-3 (2003), S. 111–122.
- [37] R. Nauber, M. Burger, L. Büttner, S. Franke, D. Rübiger, S. Eckert und J. Czarske. „Novel ultrasound array measurement system for flow mapping of complex liquid metal flows“. In: *The European Physical Journal Special Topics* 220.1 (2013), S. 43–52.
- [38] N. Thieme, P. Bönisch, D. Meier, R. Nauber, L. Büttner, K. Dadzis, O. Pätzold, L. Sylla und J. Czarske. „Ultrasound flow mapping for the investigation of crystal growth“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 64.4 (2017), S. 725–735.

- [39] K. Mäder, R. Nauber, V. Galindo, H. Beyer, L. Büttner, S. Eckert und J. Czarske. „Phased array ultrasound system for planar flow mapping in liquid metals“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 64.9 (2017), S. 1327–1335.
- [40] B. Dunmire, K. Beach, K. Labs, M. Plett und D. Strandness Jr. „Cross-beam vector Doppler ultrasound for angle-independent velocity measurements“. In: *Ultrasound in medicine & biology* 26.8 (2000), S. 1213–1235.
- [41] C. Poelma. „Ultrasound imaging velocimetry: a review“. In: *Experiments in Fluids* 58.1 (2017), S. 3.
- [42] K.-H. Nam, E. Yeom, H. Ha und S.-J. Lee. „Velocity field measurements of valvular blood flow in a human superficial vein using high-frequency ultrasound speckle image velocimetry“. In: *The international journal of cardiovascular imaging* 28.1 (2012), S. 69–77.
- [43] A. Gurung und C. Poelma. „Measurement of turbulence statistics in single-phase and two-phase flows using ultrasound imaging velocimetry“. In: *Experiments in Fluids* 57.11 (2016), S. 171.
- [44] A. Gurung, J. Haverkort, S. Drost, B. Norder, J. Westerweel und C. Poelma. „Ultrasound image velocimetry for rheological measurements“. In: *Measurement Science and Technology* 27.9 (2016), S. 094008.
- [45] C. Errico, J. Pierre, S. Pezet, Y. Desailly, Z. Lenkei, O. Couture und M. Tanter. „Ultrafast ultrasound localization microscopy for deep super-resolution vascular imaging“. In: *Nature* 527.7579 (2015), S. 499.
- [46] W. R. Hedrick, D. L. Hykes und D. E. Starchman. *Ultrasound Physics and Instrumentation*. Elsevier Mosby, 2005.
- [47] J. Lester W. Schmerr. *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation: A Modeling Approach*. Hrsg. von M. G. Cain, G. B. Rossi, J. Tesar und M. van Veghel. Springer, 2016.
- [48] U. Riebel und F. Löffler. „The fundamentals of particle size analysis by means of ultrasonic spectrometry“. In: *Particle & Particle Systems Characterization* 6.1-4 (1989), S. 135–143.
- [49] M. J. Povey. „Ultrasound particle sizing: A review“. In: *Particuology* 11.2 (2013), S. 135–147.
- [50] P. R. Hoskins, K. Martin und A. Thrush. *Diagnostic ultrasound: physics and equipment*. Cambridge University Press, 2010.
- [51] C. Kasai, K. Namekawa, A. Koyano und R. Omoto. „Real-time two-dimensional blood flow imaging using an autocorrelation technique“. In: *IEEE Transactions on sonics and ultrasonics* 32.3 (1985), S. 458–464.

- [52] T. Loupas, J. Powers und R. W. Gill. „An axial velocity estimator for ultrasound blood flow imaging, based on a full evaluation of the Doppler equation by means of a two-dimensional autocorrelation approach“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 42.4 (1995), S. 672–688.
- [53] M. D. Fox. „Multiple crossed-beam ultrasound Doppler velocimetry“. In: *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics* 25.5 (1978), S. 281–286.
- [54] C. Poelma, R. Van der Mijle, J.-M. Mari, M.-X. Tang, P. D. Weinberg und J. Westerweel. „Ultrasound imaging velocimetry: Toward reliable wall shear stress measurements“. In: *European Journal of Mechanics-B/Fluids* 35 (2012), S. 70–75.
- [55] M. Raffel, C. E. Willert, F. Scarano, C. J. Kähler, S. T. Wereley und J. Kompenhans. *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer, 2018.
- [56] R. J. Adrian. „Twenty years of particle image velocimetry“. In: *Experiments in fluids* 39.2 (2005), S. 159–169.
- [57] J. Westerweel, G. E. Elsinga und R. J. Adrian. „Particle image velocimetry for complex and turbulent flows“. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 45 (2013), S. 409–436.
- [58] Z. J. Taylor, R. Gurka, G. A. Kopp und A. Liberzon. „Long-duration time-resolved PIV to study unsteady aerodynamics“. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 59.12 (2010), S. 3262–3269.
- [59] K. Ohmi und H.-Y. Li. „Particle-tracking velocimetry with new algorithms“. In: *Measurement Science and Technology* 11.6 (2000), S. 603.
- [60] C. J. Kähler, S. Scharnowski und C. Cierpka. „On the resolution limit of digital particle image velocimetry“. In: *Experiments in fluids* 52.6 (2012), S. 1629–1639.
- [61] B. B. Goldberg, J.-B. Liu und F. Forsberg. „Ultrasound contrast agents: a review“. In: *Ultrasound in medicine & biology* 20.4 (1994), S. 319–333.
- [62] P. J. Frinking, A. Bouakaz, J. Kirkhorn, F. J. Ten Cate und N. De Jong. „Ultrasound contrast imaging: current and new potential methods“. In: *Ultrasound in medicine & biology* 26.6 (2000), S. 965–975.
- [63] J. Allegra und S. Hawley. „Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 51.5B (1972), S. 1545–1564.
- [64] A. Harker und J. Temple. „Velocity and attenuation of ultrasound in suspensions of particles in fluids“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 21.11 (1988), S. 1576.
- [65] R. Nauber. *Untersuchung bildgebender Ultraschallmesstechnik für instationäre Strömungsvorgänge in der Magnetohydrodynamik*. Bd. 13. Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske, 2018. ISBN: 978-3-8440-6387-5.
- [66] S.-E. Måsøy, Ø. Standal, J. M. Deibele, S. P. Näsholm, B. Angelsen, T. F. Johansen, T. A. Tangen und R. Hansen. „Nonlinear propagation acoustics of dual-frequency wide-band excitation pulses in a focused ultrasound system“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 128.5 (2010), S. 2695–2703.

- [67] O. F. Myhre, T. F. Johansen und B. A. Johan Angelsen. „Analysis of acoustic impedance matching in dual-band ultrasound transducers“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.2 (2017), S. 1170–1179.
- [68] C. Kupsch, D. Weik, L. Feierabend, R. Nauber, L. Büttner und J. Czarske. „Vector Flow Imaging of a Highly Laden Suspension in a Zinc-Air Flow Battery Model“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 66.4 (2019), S. 761–771.
- [69] M. Molero-Armenta, U. Iturrarán-Viveros, S. Aparicio und M. G. Hernández. „Optimized OpenCL implementation of the Elastodynamic Finite Integration Technique for viscoelastic media“. In: *Computer Physics Communications* 185.10 (2014), S. 2683–2696.
- [70] G. W. C. Kaye und T. Laby. *Tables of physical and chemical constants 16th edn* (Harlow). 1995.
- [71] JCGM. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Techn. Ber. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. URL: http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf.
- [72] T. Rösgen. „Optimal subpixel interpolation in particle image velocimetry“. In: *Experiments in Fluids* 35.3 (2003), S. 252–256.
- [73] J. Westerweel. „On velocity gradients in PIV interrogation“. In: *Experiments in Fluids* 44.5 (2008), S. 831–842.
- [74] D. C. Tretheway und C. D. Meinhardt. „Apparent fluid slip at hydrophobic micro-channel walls“. In: *Physics of fluids* 14.3 (2002), S. L9–L12.
- [75] F. H. Marchesini, M. F. Naccache, A. Abdu, A. A. Alicke und P. R. de Souza Mendes. „Rheological characterization of yield-stress materials: Flow pattern and apparent wall slip“. In: *Appl. Rheol* 25 (2015), S. 53883.
- [76] A. Y. Malkin und S. Patlazhan. „Wall slip for complex liquids–phenomenon and its causes“. In: *Advances in colloid and interface science* 257 (2018), S. 42–57.
- [77] M.-A. Fardin, T. Ober, C. Gay, G. Grégoire, G. McKinley und S. Lerouge. „Potential “ways of thinking” about the shear-banding phenomenon“. In: *Soft Matter* 8.4 (2012), S. 910–922.
- [78] J. Paredes, N. Shahidzadeh-Bonn und D. Bonn. „Shear banding in thixotropic and normal emulsions“. In: *Journal of Physics: Condensed Matter* 23.28 (2011), S. 284116.
- [79] P. Møller, S. Rodts, M. Michels und D. Bonn. „Shear banding and yield stress in soft glassy materials“. In: *Physical Review E* 77.4 (2008), S. 041507.
- [80] R. Arnold, P. S. Santos, O. Campanella und W. Anderson. „Rheological and thermal behavior of gelled hydrocarbon fuels“. In: *Journal of Propulsion and Power* 27.1 (2011), S. 151–161.

- [81] C. Kupsch, L. Feierabend, R. Nauber, L. Büttner und J. Czarske. „Flow investigation of complex suspension electrodes for battery applications using ultrasound imaging velocimetry“. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 109 (2019), S. 109886. ISSN: 0894-1777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109886>.
- [82] J.-M. Hyvelin, I. Tardy, C. Arbogast, M. Costa, P. Emmel, A. Helbert, M. Theraulaz, A. D. Nunn und F. Tranquart. „Use of ultrasound contrast agent microbubbles in preclinical research: recommendations for small animal imaging“. In: *Investigative radiology* 48.8 (2013), S. 570–583.
- [83] D. H. Simpson, C. T. Chin und P. N. Burns. „Pulse inversion Doppler: a new method for detecting nonlinear echoes from microbubble contrast agents“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 46.2 (1999), S. 372–382.
- [84] M. Mozaffarzadeh, M. Sadeghi, A. Mahloojifar und M. Orooji. „Double-stage delay multiply and sum beamforming algorithm applied to ultrasound medical imaging“. In: *Ultrasound in medicine & biology* 44.3 (2018), S. 677–686.
- [85] G. Matrone, A. S. Savoia, G. Caliano und G. Magenes. „The delay multiply and sum beamforming algorithm in ultrasound B-mode medical imaging“. In: *IEEE transactions on medical imaging* 34.4 (2014), S. 940–949.
- [86] D. Allan, T. Caswell, N. Keim und C. van der Wel. *trackpy: Trackpy v0.3.2*. 2016. DOI: 10.5281/zenodo.60550. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.60550>.
- [87] J. C. Crocker und D. G. Grier. „Methods of digital video microscopy for colloidal studies“. In: *Journal of colloid and interface science* 179.1 (1996), S. 298–310.
- [88] G. Montaldo, M. Tanter, J. Bercoff, N. Benech und M. Fink. „Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 56.3 (2009), S. 489–506.

Publikationsverzeichnis

Aus Prioritätsgründen wurden Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit bereits veröffentlicht.

Artikel in Zeitschriften mit peer-review

Kupsch, C., Feierabend, L., Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., „Ultrasound super-resolution flow measurement of suspensions in narrow channels“. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* (2020).

Kupsch, C., Feierabend, L., Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., „Flow investigation of complex suspension electrodes for battery applications using ultrasound imaging velocimetry“. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 109 (2019), S. 109886. ISSN: 0894-1777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109886>.

Kupsch, C., Weik, D., Feierabend, L., Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., „Vector Flow Imaging of a Highly Laden Suspension in a Zinc-Air Flow Battery Model“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 66.4 (2019), S. 761–771.

Weik, D., **Kupsch, C.**, Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., „Uncertainty comparison of velocity estimators for ultrasound flow imaging in narrow channels/Messunsicherheitsvergleich von Geschwindigkeitsschätzern der Ultraschallströmungsbildgebung in schmalen Kanälen“. In: *tm-Technisches Messen* 86.s1 (2019), S. 7–11.

Kalibatas, M., Nauber, R., **Kupsch, C.**, Czarske, J., „Flow Field Imaging With Ultrasonic Guided Waves for Exploring Metallic Melts“. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 65.1 (2018), S. 112–119.

Fischer, A., **Kupsch, C.**, Gürtler, J., Czarske, J., „Volumetrische Strömungsmessungen mittels plenoptischer Hochgeschwindigkeitskamera“. In: *tm-Technisches Messen* 83.1 (2016), S. 9–15.

Fischer, A., **Kupsch, C.**, Gürtler, J., Czarske, J., „High-speed light field camera and frequency division multiplexing for fast multi-plane velocity measurements“. In: *Optics express* 23.19 (2015), S. 24910–24922.

Tagungsbeiträge

Kupsch, C., Feierabend, L., Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., „Super-resolution ultrasound flow imaging of suspensions in narrow channels“. In: *International Congress on Ultrasonics* (Brügge, Belgien). 2019.

- Feierabend, L., **Kupsch, C.**, „Macroscopic Flow Simulation of Multiphase Suspension Electrodes for Zinc-Air Batteries“. In: *16th multiphase flow conference* (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Deutschland, 15. Nov. 2018). 2018.
- Kupsch, C.**, Feierabend, L., Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., „Super-resolution ultrasound flow measurement of the non-Newtonian multiphase suspension in a zinc-air flow battery“. In: *16th multiphase flow conference* (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Deutschland, 15. Nov. 2018). 2018.
- Kupsch, C.**, Feierabend, L., Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., „Ultrasound flow investigations at a zinc-air flow battery model“. In: *International Conference on Experimental Fluid Mechanics* (Universität der Bundeswehr, München, Deutschland, 3. Juli 2018). 2018.
- Kupsch, C.**, Schmieder, F., Büttner, L., Czarske, J., Feierabend, L., „Optical and acoustic flow measurement systems for fuel cells and flow batteries“. In: *AiF-Brennstoffzellen-Allianz Workshop* (ZBT GmbH, Duisburg, Deutschland, 27. Juni 2018). 2018.
- Kupsch, C.**, Feierabend, L., Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., „Flowmapping in a model of a secondary hydraulic zinc-air battery“. In: *International workshop on liquid metal battery fluid dynamics* (QF Hotel, Dresden, Deutschland, 15. Mai 2017). 2017.
- Kupsch, C.**, Nauber, R., Büttner, L., Czarske, J., Feierabend, L., „Ultrasound flow mapping in a model of a secondary hydraulic zinc-air battery“. In: *2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. IEEE. 2017, S. 1–4.
- Dawidowski, D., Nauber, R., **Kupsch, C.**, Büttner, L., Czarske, J., „Modular Ultrasound Measurement Technique and its Application in Time Reversal Experiments“. In: *XXX. Messtechnisches Symposium*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG. 2016, S. 29.
- Feierabend, L., **Kupsch, C.**, Nauber, R., Burgmann, S., Büttner, L., Oberschachtsiek, B., Czarske, J., Heinzl, A., „Ultraschallmessung und Modellierung von magnetohydraulischen Strömungen in Zink-Slurry-Batterien“. In: *9. Workshop der AiF-Brennstoffzellen-Allianz* (ZBT GmbH, Duisburg, Deutschland, 21. Juni 2016). 2016.
- Kupsch, C.**, Czarske, J., „Akustische Charakterisierung einer Suspension“. In: *Workshop Ultraschallmesstechnik* (Bad Schandau, Deutschland, 26. Okt. 2016). 2016.
- Kupsch, C.**, Czarske, J., „Multimodales Ultraschallmesssystem zur Untersuchung von Flüssigmetallströmungen in der Halbleiterkristallzucht“. In: *Workshop Messtechnische Anwendungen von Ultraschall* (Kloster Drübeck, Ilseburg, Deutschland, 21. Juni 2016). 2016.
- Mäder, K., Nauber, R., Beyer, H., Klaß, A., **Kupsch, C.**, Thieme, N., Büttner, L., Czarske, J., „Research Platform for Adaptive Ultrasound Flow Mapping in Liquid Metals“. In: *18. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme* (Nürnberg, Deutschland, 11. Mai 2016). 2016.
- Nauber, R., Beyer, H., Mäder, K., **Kupsch, C.**, Thieme, N., Büttner, L., Czarske, J., „Modular ultrasound velocimeter for adaptive flow mapping in liquid metals“. In: *2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. IEEE. 2016, S. 1–4.

Patente

Heitkam, S., Büttner, L., Czarske, J., Nauber, R., **Kupsch, C.**, „Verfahren und Anordnung zur ortsspezifischen Charakterisierung der Phasenzusammensetzung sowie der Strömungsverhältnisse innerhalb eines Schaumvolumen“. 102019123298.8. eingereicht beim DPMA. 2019.